



**AŞI LOJİSTİĞİNE, SARS-COV-2 VARYANTLARINA VE
YAYILMA ORANINA DAYALI COVID-19 PANDEMİK
DEĞERLENDİRMESİ İÇİN BİR SİMÜLASYON
YAKLAŞIMI**

Ferhat AK

Danışman: Doç. Dr. Burak ERKAYMAN
Yüksek Lisans Tezi
Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2021
(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**AŞI LOJİSTİĞİNE, SARS-COV-2 VARYANTLARINA VE YAYILMA ORANINA
DAYALI COVID-19 PANDEMİK DEĞERLENDİRMESİ İÇİN BİR SİMÜLASYON
YAKLAŞIMI**

(A Simulation Approach For Covid-19 Pandemic Assessment Based on Vaccine Logistics,
Sars-Cov-2 Variants and Spread Rate)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ferhat AK

Danışman: Doç Dr. Burak ERKAYMAN

Erzurum
Haziran, 2021

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Ferhat AK tarafından hazırlanan “AŞI LOJİSTİĞİNE, SARS-COV-2 VARYANTLARINA VE YAYILMA ORANINA DAYALI COVID-19 PANDEMİK DEĞERLENDİRMESİ İÇİN BİR SİMÜLASYON YAKLAŞIMI” başlıklı çalışması .. / .. / 20.. tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Endüstri Mühendisliği Bilim Dalında, yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Unvan Ad SOYAD
Üniversite Adı

Danışman: Unvan Ad SOYAD
Üniversite Adı

Jüri Üyesi: Unvan Ad SOYAD
Üniversite Adı

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Burak ERKAYMAN danışmanlığında sunulan “AŞI LOJİSTİĞİNE, SARS-COV-2 VARYANTLARINA VE YAYILMA ORANINA DAYALI COVID-19 PANDEMİK DEĞERLENDİRMESİ İÇİN BİR SİMÜLASYON YAKLAŞIMI” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	2	30
Kuramsal Temeller	0	30
Materyal ve Yöntem	0	35
Bulgular	1	20
Tartışma	0	20
Tezin Geneli	12	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Ferhat AK	Doç. Dr. Burak ERKAYMAN
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŐEKKÖR

Tezimi hazırlama sürecinde bana aktarmıő olduğu önemli bilgileri ve bu aşamada beni iyi yönde yönlendiren, çalışmam boyunca beni sabırla dinleyen ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen hocam Sayın Doç. Dr. Burak ERKAYMAN'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Eğitim hayatım boyunca destekleri ile benim bu seviyelere gelmemi sağlayan, maddi ve manevi desteklerini her daim gösteren sevgili ailem ve kıymetli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ferhat AK



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AŞI LOJİSTİĞİNE, SARS-COV-2 VARYANTLARINA VE YAYILMA ORANINA DAYALI COVID-19 PANDEMİK DEĞERLENDİRMESİ İÇİN BİR SİMÜLASYON YAKLAŞIMI

Ferhat AK

Danışman: Doç. Dr. Burak ERKAYMAN

Amaç: Oluşturulan Sistem Dinamiği (SD) temelli simülasyon modeli ile uygulanan farklı aşı tedarik sayılarına göre toplumsal bağışıklığın ne kadarlık bir sürede %70 seviyesine ulaşabildiğini öngörmektir.

Yöntem: Bu çalışmada COVID-19 salgınının yayılım hızını etkileyen faktörler göz önünde bulundurularak içerisinde aşı lojistiğini, sosyal yaşam kısıtlamalarını ve çeşitli COVID-19 varyantlarını da barındıran Sistem Dinamiği temelli genişletilmiş bir SIR modeli tasarlanmıştır. Çalışmada kullanılan verilerin bir kısmı literatürde bulunan Türkiye ve Dünya verilerine dayanırken bir kısmı ise yapılan diğer çalışmalardan faydalanılarak belirlenmiştir. Tasarlanan simülasyon modeli AnyLogic 8.7.2 programı içerisinde modellenmiştir.

Bulgular: COVID-19 pandemisi için geliştirilen SD temelli bu simülasyon çalışmasında gerek Türkiye Cumhuriyeti Devleti gerekse dünya genelinden elde edilen salgın verileri ile model oluşturulmuş ve çeşitli veriler elde edilerek yorumlanmıştır.

Sonuç: Epidemik parametrelere, aşı lojistiğine, SARS-CoV-2 varyantlarına ve yayılma oranına dayalı COVID-19 pandemik değerlendirme için sistem dinamiği temelli bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Model üç farklı aşı tedarik senaryosu için çalıştırılarak sonuçlar alınmış ve bu sonuçlar doğrultusunda gerekli yorum ve çıkarımlarda bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: SD Modelleri, SIR Modelleri, Aşı Lojistiği, Simülasyon, Toplumsal Bağışıklık

Haziran 2021, 69 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

A SIMULATION APPROACH FOR COVID-19 PANDEMIC ASSESSMENT BASED ON VACCINE LOGISTICS, SARS-COV-2 VARIANTS AND SPREAD RATE

Ferhat AK

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Burak ERKAYMAN

Purpose: It is to predict how long it takes to reach 70% level of herd immunity according to the different vaccine supply numbers applied with the created System Dynamics (SD) based simulation model.

Method: In this study, an extended SIR model based on System Dynamics was designed, which includes vaccine logistics, social life restrictions and various COVID-19 variants, considering the factors affecting the rate of spread of the COVID-19 epidemic. While some of the data used in the study is based on the data of Turkey and the world in the literature, some of them were determined by making use of other studies. The designed simulation model is modeled in AnyLogic 8.7.2 program.

Findings: In this SD-based simulation study developed for the COVID-19 pandemic, a model was created with the epidemic data obtained from both the Republic of Turkey and the world, and various data were obtained and interpreted.

Results: A system dynamics-based simulation model was created for the COVID-19 pandemic assessment based on epidemic parameters, vaccine logistics, SARS-CoV-2 variants and spread rate. The model was run for three different vaccine supply scenarios, and results were obtained and necessary comments and inferences were made in line with these results.

Keywords: SD Models, SIR Models, Vaccine Logistics, Simulation, Herd Immunity

June 2021, 69 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	x
GİRİŞ.....	1
KAYNAK ÖZETLERİ.....	1
MATERYAL ve YÖNTEM	13
Simülasyon Kavramı.....	13
Simülasyonun Tarihi	14
Simülasyonun Amacı	14
Simülasyonun Avantaj ve Dezavantajları	15
Simülasyonun Uygulama Alanları	16
Simülasyon Modellerinin Sınıflandırılması	17
Kesikli ve sürekli simülasyon modelleri	18
Statik ve dinamik simülasyon modelleri	18
Stokastik ve deterministik simülasyon modelleri	18
Simülasyonun Aşamaları	19
Problemin tanımlanması.....	20
Hedeflerin ve genel proje planının belirlenmesi	21
Modelin kavramsallaştırılması	21
Veri toplama ve analizi	21
Modelin oluşturulması	22
Modelin doğruluğu.....	22
Modelin geçerliliği	23
Deney tasarımı	23
Çalıştırma ve analiz.....	23
Dökümantasyon ve raporlama.....	23
Uygulama	24

Sistem Dinamiği.....	25
SD Modelleme Süreci	25
Problemin tanımlanması.....	26
Sistemin tanımlanması ve etki diyagramlarının oluşturulması	27
Nitel analizler	29
Benzetim modelinin oluşturulması	29
Politikaların test edilmesi ve tasarımı	30
SIR Salgın Modelleri	33
SIRS Salgın Modelleri	34
SEIR Salgın Modelleri	35
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	37
Simülasyon Modelinin Oluşturulması.....	37
Nedensel döngü diyagramlarının oluşturulması.....	38
SD modelinde kullanılan formülasyonlar ve veri analizi.....	40
Senaryo Analizi	44
Simülasyon Çıktıları	45
Tartışma.....	48
SONUÇLAR.....	49
KAYNAKÇA	50
ÖZGEÇMİŞ.....	55

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. SD Modeline Ait Stok Bilgileri	41
Tablo 2. SD Modeline Ait Akış Bilgileri.....	42
Tablo 3. SD Modeline Ait Parametre Bilgileri	43
Tablo 4. SD Modeline Ait Yardımcı Değişken Bilgileri	44
Tablo 5. Simülasyona Ait Senaryo Sonuçları	48



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Simülasyon çalışmasının aşamaları	20
Şekil 2. SD modelleme aşamaları	26
Şekil 3. Kapalı ve açık döngü yapıları	28
Şekil 4. Pozitif ve negatif geribildirim yapısı	29
Şekil 5. SIR model yapısı	34
Şekil 6. SIRS model yapısı.....	35
Şekil 7. SEIR model yapısı.....	36
Şekil 8. SD modeline ait akış diyagramı	38
Şekil 9. SD modeline ait Nedensel Döngü Diyagramı.....	39
Şekil 10. SD modeline ait Balık Kılçığı Diyagramı.....	39
Şekil 11. SD modeline ait Stok Akış diyagramı.....	40
Şekil 12. Aylık 15 milyon adet aşı tedariki için elde edilen sayısal veri çıktısı.....	45
Şekil 13. Aylık 15 milyon adet aşı tedariki için elde edilen zaman grafiği	46
Şekil 14. Aylık 30 milyon adet aşı tedariki için elde edilen sayısal veri çıktısı.....	46
Şekil 15. Aylık 30 milyon adet aşı tedariki için elde edilen zaman grafiği	47
Şekil 16. Aylık 40 milyon adet aşı tedariki için elde edilen sayısal veri çıktısı.....	47
Şekil 17. Aylık 40 milyon adet aşı tedariki için elde edilen zaman grafiği.	48

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

ABM	: Ajan Bazlı Modelleme
AVR	: Antiviral-Resistant
AVS	: Antiviral-Sensitive
CA	: Hücresel Otomata
CLCC	: Ekili Arazi Taşıma Kapasitesi
COVID-19	: Koronavirüs Hastalığı
DENV	: Bir Tür Salgın İletim Yöntemi
EVH	: Ebola Virüsü Hastalığı
GLUE	: Biyoenerji Temelli Küresel Enerji Modeli
H 1 N 1	: Domuz Gribi Virüsü
LA-MRSA	: Burun Mukozasının Ön Bölümünde ve Deri Üzerinde Yaşayan Bakterilerdir
MRSA	: Burun Mukozasının Ön Bölümünde ve Deri Üzerinde Yaşayan Bakterilerdir
NDD	: Nedensel Döngü Diyagramı
R0	: Temel Üreme Katsayısı
RK4	: Runge–Kutta
SARS-CoV-2	: Şiddetli Akut Solunum Sendromu - Koronavirüs 2
SD	: Sistem Dinamiği
SEIR	: Duyarlı-Maruz-Enfekte-İyileştirilmiş
SIR	: Duyarlı-Enfekte-İyileştirilmiş
SIRS	: Duyarlı-Enfekte-İyileşmiş-Duyarlı
STIRPAT	: Stokastik Etkiler Tarafından Yeniden gerileme Üzerinde Nüfus Refah ve Teknoloji

GİRİŞ

Aralık 2019’ da Çinin Wuhan şehrinde bir hayvan pazarından çok hızlı bir şekilde yayılarak neredeyse tüm dünyayı etkisi altına alan, hızlı bir şekilde yüksek ölüm oranlarına ulaşan SARS-CoV-2 (Şiddetli Akut Solunum Sendromu - Koronavirüs 2) virüsünün neden olduğu Koronavirüs Hastalığı (COVID-19) dünya genelinde büyük bir salgına dönüşmüştür. COVID-19, 2019’da ortaya çıktıktan sonra, bu hastalıktan kaynaklı ölüm oranları ve bünyesinde barındırdığı sağlık komplikasyonlarından dolayı birçok bilimsel bakış açısı tarafından aktif bir bilimsel araştırma kaynağı haline gelmiştir. Bu hastalığa ait ortaya çıkan semptomlar öksürük, nefes darlığı, ateş ve yorgunluktur. Hastalık, öksürük ve hapşırma gibi doğal damlacık yoluyla hasta bir kişiden ağız ve göz gibi vücut uzuvlarını kullanarak sağlıklı bir kişiye bulaşmaktadır. Ancak bazı hasta kişilerde bunlar daha ileri safhalarda görülür ve hastanın ölümüyle sonuçlanabilir. Henüz pandeminin bu aşamasında sonuçlarının belirlenmesi zor olan ekonomik ve mali sonuçlar da dahil, bu hastalığın dünya çapında küresel bir şekilde yayılmasının çok daha ciddi sonuçlarının olduğunu ve enfeksiyonun yayılmasını azaltmak için hükümetlerin birçok politika üstlendiğini söylemek mümkündür.

COVID-19 hakkındaki güncel olan modelleme çalışmaları, genellikle epidemiyolojik konular üzerine odaklanır ve hem salgının temel üreme katsayısını tahmin etmek hem de hastalığın yükselişini azaltmaya yönelik çeşitli müdahalelerin ne kadar etkin olduğunu tahmin etmeye yardımcı olmaktadır (Currie et al., 2020).

Bu şekildeki epidemik modellemeler genellikle SIR (Duyarlı-Enfekte-İyileştirilmiş) modelleri olarak bilinen parçalı modellerle oluşturulur. Bu model türleri, kavramsal modellerle ve popülasyon dinamikli modellerle aynı alt yapıdadır. Bu türdeki modeller, hastalığa açık kişiler (örn; henüz virüs bulaşmamış ve enfeksiyona açık kişiler), enfekte kişiler (örn; virüs tarafından enfeksiyona uğramış kişiler) ve iyileşen kişiler (örn; enfekte olduktan sonra iyileşmiş olan kişiler) arasında alt sınıflara ayrılmış olan popülasyonun belirlenen bölümlerinin zamana bağlı olarak nasıl evrildiğini simüle eder(Comunian et al., 2020). Kişilerin sınıflar arası transferini sağlamak için bazı matematiksel formüllere dayanmaktadır.

Bulaşıcı bir salgında temel üreme katsayısı olan R_0 , hastalığa açık bir popülasyonda yalnızca bir tane enfekte olan kişi tarafından üretilmiş olan ikincil enfekte olmuş hasta sayısını ifade eder. Bu katsayı genel olarak belirli bir popülasyondaki yayılmakta olan bulaşıcı bir hastalığın bulaşma seviyesini belirlemek için kullanılan bir referans değeridir. Bu durumda

enfeksiyonun bulaşma ihtimali olan (hastalığa açık) kişi sayısındaki artış R_0 değerinin daha yüksek çıkmasına ve enfeksiyonun daha fazla kişiye bulaşmasına neden olacaktır. Böylece R_0 ile bulaşıcı bir salgının ortaya çıkma boyutu arasında gözle görülür bir pozitif ilişki sağlanmış olur (Battiston & Gamba, 2021).

COVID-19 hastalığı gibi birçok bulaşıcı hastalığın yayılma hızını ve ölümcül etkilerini hafifletmek için bilgisayar ortamında çeşitli görselleştirme ve simülasyon modellerinden faydalanılır. Bu modelleri oluştururken kullanılan yöntemlerin başında Sistem Dinamiği (SD) gelmektedir. SD modelleme tekniği, sistem içerisinde bulunan parametrelere ve parametreler arasındaki etkileşim ve geri besleme döngülerine göre çalışmaktadır. Parametreleri birbirleri ile pozitif-negatif yönde etkileyerek nasıl değişim sağladığını göstermektedir (Gökçe, 2008).

Bu çalışmada COVID-19 salgınına dair toplumsal karantina politikaları, kişisel insan iletişimleri, hastalığın yayılmasında etkili rol oynayan temel üreme katsayısı olan R_0 , salgın sırasında görülen çeşitli COVID-19 salgın varyantları ve salgının seyri sırasında ortaya çıkan çeşitli toplumsal salgın oranları gibi birçok salgın verisi SD çerçevesinde modellenmiştir. Bunlara ek olarak COVID-19 hastalığında toplumu derinden ilgilendiren ve aşının topluma uygulanması ile birlikte toplumsal bağışıklığa etkisi yine bu SD çerçevesi kullanılarak modellenmiştir.

Bu çalışmada geliştirilen SD modeli, (Araz, 2013) tarafından tasarlanan SIR (Duyarlı-Enfekte-İyileştirilmiş) temelli simülasyon modeli göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Bu SD modelinin uygulama kısmında kullanılan çeşitli parametre ve değişkenlerde literatüre dayalı veriler ile bu verilerden yararlanılarak elde edilmiş değerlere yer verilmiştir. Epidemik parametrelere, aşı lojistiğine, SARS-CoV-2 varyantlarına ve yayılma oranına dayalı COVID-19 pandemik değerlendirmesi için sistem dinamiği temelli bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Bu simülasyon modeli Türkiye ve Dünya üzerindeki bazı salgın verileri kullanılarak AnyLogic 8.7.2 programında üç farklı aşı tedarik senaryosu üzerine simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

KAYNAK ÖZETLERİ

(Shulgin et al., 1998) çalışmalarında kızamık 'nabız' aşılama stratejisinin, nispeten düşük aşılama değerlerinde hastalık eradikasyonuna yol açmada geleneksel stratejilerden ayırt edilebileceğini göstermiştir. SIR salgın modelini çalıştırarak, planlanmış bir nabız aşılama olayı içerisinde, sistemin bulaşıcı olan kişilerinin sıfıra eşit olan kararlı bir çözüme yaklaştığını belirlemiştir. Bakliyatların aşılama oranı ve süresi ile ilgili belirli koşullara uyulması halinde, bakliyat aşısının salgın hastalıkların ortadan kaldırılmasına yol açtığını göstermiştir.

(Yamamoto et al., 1999) çalışmalarında amacı, dünya üzerindeki küresel biyoenerji potansiyelini değerlendirmektir. Bu amaç için yapılmış olan bu çalışmada yazarlar, tasarlayacakları simülasyon modeli için bir SD (Sistem Dinamiği) tekniği kullanılarak formüle edilmiş küresel çapta bir arazi kullanımı ve buna bağlı olarak kullanılması düşünülen enerji modeli (GLUE) geliştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında şu sonuçlara ulaşılmıştır. (1) Çalışmadan elde edilen modele göre dünyanın gelişmiş birçok bölgesindeki fazla olan ekilebilir araziden elde edilmiş olan enerji ürünleri için belirli bir potansiyel kaynak olacaktır. Ancak elde edilen bu potansiyel enerji kaynağı küresel gıdaya ait arz ve talebe aşırı duyarlı olduğu için dikkatli olunmalıdır. (2) Dünya genelinden elde edilen biyokütle kalıntıları için büyük bir biyoenerji potansiyeli oluşması beklenmektedir. Bu potansiyel grup içerisinde tahıl hasadı artıkları, hayvan gübresi, yuvarlak ağaç kesme artıkları ve kereste hurdaları gibi bir çok doğal ve insan yapımı ürünler bulunmaktadır. (3) Çalışma kapsamındaki gelişmekte olan bölgelerde gelişmiş olgun orman alanının, 1990'da 2,1 milyar metre kareden 2100'de 0,8 milyar metre kareye düşmesi beklenmektedir.

(Lu et al., 2002) çalışmalarında yatay ve dikey iletimli bir SIR salgın modeli sunulmaktadır. Bu salgın modeline ait dinamikler sabit ve darbeli aşılama olmak üzere iki tip aşılama başlığı içerisinde çözülmüştür. Elde edilen teorik sonuçlar, ara verilmeden yapılan aşılama içerisinde dinamik davranışın hiç aşı yapılmamasına azda olsa benzer olduğunu göstermektedir. Ancak planlı yapılmış olan bir nabız aşılama hızı içerisinde, sistem, sıfıra eşit olan enfekte hasta sayısı ile istikrarlı bir şekilde devam eden periyodik çözüme yakınsamıştır. Ayrıca, hiç enfeksiyon durumunun olmadığı bir periyodik simülasyon analizi üzerinde de çalışılmıştır. Çatallanma teorisi kullanılarak kayda değer bir önemi olmayan periyodik bir çözümün oluşma olasılığı üzerinde genel bir çerçeve düşünülmüştür. Elde edilen teorik sonuçlar kullanılan sayısal simülasyonlarla birlikte doğrulanmıştır.

(McCormack & Allen, 2005) çalışmalarında patojenin genetiğinin dahil edildiği bir konakçı-patojen sistemi için bir model geliştirilmiştir. Patojen evrimi, *n'nin* bulunduğu tek bir otozomal lokus (haploid veya diploid) tarafından belirlenmiştir. Konakçı popülasyon, duyarlı ve enfekte bireyler olarak ikiye ayrılır. Enfekte olmuş konakçı popülasyon, patojen popülasyonunun büyümesini yönetir. Patojen popülasyonunun Hardy-Weinberg yasasına uyduğu özel bir durum ayrıntılı olarak incelenmiştir. Konak-patojen sistemi için temel üreme sayısı tanımlanmış ve hastaliksız dengenin yerel ve küresel stabilitesi araştırılmıştır. Patojen genotiplerinin başlangıç oranlarının ve temel üreme sayısının yeni bir bulaşıcı hastalığın ortaya çıkıp çıkmayacağını belirlediği gösterilmiştir.

(Moneim, 2007) çalışmasında bir SEIR salgın modeli için mevsimsel olarak değişen bulaşıcı hastalıkların davranışı üzerinde farklı türlerde mevsimsel olarak değişen temas oranı kullanmanın etkisini incelemektedir. Bu çalışmadaki amaç sistem değişkenlerine ait olan sonuçlara karşılık sistemin davranış örneğini sunmaktır. Bu aşamada parametre olarak genlik parametresi kullanılmıştır. Kullanılan bu genlik adlı parametre ile SEIR modeline ait kararlı salgın simülasyonunun periyodik çözümünün ne kadarlık bir periyot uzunluğuna sahip olduğunu yıl bazında çizmek istenmiştir. Çalışmada kullanılan simülasyon sisteminin ikinci temel amacı ise, temas hızındaki farklılıkların salgın hastalık dinamiklerinin davranışını nasıl değiştirebileceğini açıklığa kavuşturmadır. Çalışmadaki simülasyona ait sonuçlar, mevsimlere bağlı olarak değişiklik gösteren temas hızının farklı fonksiyonel tipteki biçimlerinin simülasyon içerisinde kullanılmasının, her farklı hastalık parametre seti ve salgın temas oranı türü için birbirinden farklı çözüm odakları oluşturduğunu göstermiştir.

(Padhi & Bhardhwaj, 2009) çalışmalarında bulaşıcı hastalıkların etkili tedavisi için sinir ağlarını kullanan uyarlanabilir bir ilaç dağıtım tasarımı sunmuşlardır. Bu çalışmada kullanılan genel matematiksel model, simülasyon içerisindeki patojenlerin, plazma hücrelerinin ve diğer kullanılan ilaçların etkisi altında salgın nedeniyle çalışması ve fiziksel yapısı hasar gören bir organın standart çalışma özelliklerini yansıtan ve sayısal bir değer olan antikorların içeriğinin nasıl bir yapıya sahip olduğunu tanımlar. Yapılan simülasyon sisteminin kullandığı karmaşık bakış açısı, sistemde kullanılan diğer ilaçların kontrol ve sistematik kavramlarına dayalı olarak tasarlanmış olan kontrol girdisi bakış açısı ile yorumlanmıştır. Bu çalışmada, matematiksel modelde bir dizi nominal parametre olduğu varsayılarak, önce dinamik ters çevirme ilkesine dayalı olarak doğrusal olmayan bir kontrolör (ilaç uygulaması) tasarlanmıştır. Son olarak çevrimiçi yani uzaktan kontrol sistemli bir modelle eğitilen sinir ağları vasıtasıyla sistem tasarımı yapılmıştır.

(Tan & Wang, 2010) çalışmalarında dünya üzerinde bulunan su kaynakları ile çevreye duyarlı bir sosyal ekonomik sistem ve bu sistemin can damarı olan su ekosistemi arasındaki bağlantı korelasyonunu açık ve anlaşılır bir şekilde betimlediğine inanılan bir SD modeline dayalı Stella yazılımını kullanarak oluşturulmuş bir su kıtlığı erken uyarı sistemi oluşturmuştur. Çalışmada tasarlanan ekolojik akış, dünya üzerinde kullanılan su talebinde vazgeçilmez bir unsur olarak kabul edilmiştir. Bu sebepten ötürü, çalışmada gerçekleştirilen ekolojik akışın sayısal hesaplama modeli, modellenen akışı geleneksel su kaynakları arz ve talebi modelinden ayırarak çevresel duyarlılık adı altında oluşturulmuş olan SD modeline dahil etmiştir. Ayrıca, çalışma içerisinde belirli bir su kıtlığı senaryosu adı altında tasarlanmış olan simülasyon yoluyla ekolojik akışın yanı sıra sosyoekonomik olarak kullanılan suyun arz ve talebinin değişimini tahmin etmek için de birer arz ve talep oranı geliştirilmiştir.

(Alexanderian et al., 2011) çalışmalarında incelenen model, adi diferansiyel denklemlerle birlikte hiperbolik (birinci dereceden) kısmi diferansiyel denklemler sistemi olarak verilmiştir. İlk olarak, karakteristikler yönteminden bir temsil ve bir sabit nokta argümanı kullanarak, lineer olmayan sistemimize bir çözümün varlığını ve benzersizliğini kanıtlanmıştır. Daha sonra modele sonlu bir fark yaklaşımı sunulmuş ve yüksek-düşük kolera vibrios saçılma oranlarının hastalığın yayılma dinamikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Simülasyonlar, gerçekte gözlemlenen kolera salgınlarının patlayıcı doğasını göstermektedir. Yüksek ve düşük vibrio dökülme oranlarına ilişkin sonuçların karışıklığı, bu etkinin altında yatan olası bir nedeni ortaya koymaktadır.

(Samsuzzoha et al., 2011) çalışmalarında *H 1 N 1* influenzası için virüs davranışının temel olarak anlaşılmasını sağlamak amacıyla yaygın bir salgın modeli formüle edilmiştir. Tüm yeni doğanların duyarlı olduğu varsayılmıştır. Sistem içerisinde kullanılan popülasyondaki hatalıklı kişiler üzerindeki bazı ölüm oranı değerlerinin gerçekte olması beklenen çevresel ölüm oranından çok daha büyük olduğu tahmin edilmiş ve bu nedenle büyük değerler kullanılmıştır. Gizli, bulaşıcı ve bağışıklık dönemlerinin bu çalışma boyunca sabit olduğu varsayılmıştır. Çalışmadaki oluşturulan modele ait sayısal sonuçlar birbirinden farklı üç tip başlangıç dağılımı içerisinde simüle edilerek sonuca ulaştırılmıştır. Çalışmada oluşturulan sayısal simülasyonun, sistemde kullanılan ilk popülasyon dağılımına, salgına ait bulaşma hızına ve hastalığa ait yayılma hızına bağlı olarak sürekli ve kesikli olmak üzere iki çeşit salınımın oluşmasına sebep olduğunu göstermiştir.

(He et al., 2011) çalışmalarında oluşturacakları simülasyon modeli için SD yöntemi ile çalışma kapsamında uygulama yapılacak olan bir arazinin ekili arazi taşıma kapasitesini Centres De Lutte Contre Le Cancer (CLCC) analiz etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada

uygulama ve araştırma bölgesi olarak Guizhou Eyaleti, Bijie Eyaleti alınarak, Bijie Eyaleti'nin yapılan SD modeli çalışması kapsamında CLCC SD modeli geliştirilmiştir. Çalışmada Bijie CLCC modelinin temel özelliklerine ve bu bölge kapsamında analiz edilmesi planlanan sentetik ayarlamaya ilişkin analiz çalışmalarının kökeninde, kullanılan çeşitli deneysel şemalardan üç tanesi örnek olarak seçilmiştir. Bunlar sırasıyla çalışmanın yapılacağı bölgenin nüfusunu kontrol etmeye odaklı olan plan (Şema 1), yine çalışmanın yapılacağı bölge üzerindeki ekonomiyi örnek alan hızlı ekonomik kalkınma odaklı Plan olan (Şema 2) ve bu iki planın birlikte ele alınmasıyla oluşturulmuş olan koordineli kalkınma odaklı Plandır (Şema 3). Yapılan çalışmanın kapsamlı bir değerlendirmesi, bu üç şema arasından elde ettiği sonuçlarla sıralanmış olan Şema 3'ün sosyal-ekonomik kalkınmayı, nüfus kontrolünü ve ekili arazi kullanımını hesaba katan ve bu analizler sonucunda ekili arazi kullanımının, sosyal ve ekonominin birlikte koordinasyon gelişimini destekleyebilen en uygun plan olduğunu göstermektedir.

(Ciccolini et al., 2012) çalışmalarında hayvancılıkla ilişkili Metisiline dirençli *Staphylococcus aureus*'un yayılma ve kalıcılık modellerini araştıran basit bir matematiksel modelin sonuçlarını rapor etmektedir. Simülasyonlar, LA-MRSA' nın yalnızca hayvan hareketleri tarafından sürdürülen endemik hale gelebileceğini göstermektedir. Öngörülen son derece düşük endemik prevalansa rağmen, eradikasyon zor olmuştur ve çiftlik içi prevalansın azalması veya LA-MRSA pozitif bir çiftliğin negatif bir durumu düzeltmesi için geçen süre, uzun vadeli kalıcılığı kırmada başarısız olmuştur. Sonuçlar, düşük düzeyde hareket dışı kaynaklı bulaşmanın MRSA dinamiklerini güçlü bir şekilde etkilediğini, endemik prevalansı ve kalıcılık olasılığını artırdığını göstermektedir. Ayrıca, damızlık domuzların bulunduğu işletmelerde Avrupa çapında yakın zamanda yapılan bir LA-MRSA anketinden elde edilen sonuçlarla, 291 ayrı çiftliğin MRSA pozitif olma modelinde öngörülen riskini karşılaştırmışlardır.

(Mahamoud et al., 2013) çalışmalarında Kanada'nın, Toronto Şehri için sistem dinamiği modelleme metodolojisini kullanarak bir simülasyon modeli geliştirmiştir. Modeldeki değişkenlerin çoğu etnik köken, göçmenlik durumu, 25-64 yaş arası yetişkinlerin özelliklerini yakalayan ve cinsiyete göre katmanlara ayrılmıştır. Çalışma içerisinde kullanılan strateji alanları sağlık hizmetlerine erişim, olaylar karşısındaki davranışlar, maddi kaynaklar, barınma ve sosyal uyumu içerisine alan çeşitli terimleri içermektedir. Simülasyon modeli, sistem içerisinde kullanılan çeşitli stratejilerin hastalığa açık olan kişilerdeki kronik hastalık oranları, sakatlık oranları ve ölüm oranı gibi kötü sonuçlar doğurabilecek sağlık sonuçları üzerindeki nicel etkisini açığa çıkarmaya yardımcı olmak için geliştirilen bazı alternatif senaryoları simüle

etmiştir. Stratejiler ölüm oranı ve fiziksel psikolojiyi ne kadarlık bir etki ile ve ne kadar hızlı bir şekilde azaltılabileceğine dair çeşitli fikirler vermektedir.

(Hu et al., 2013) çalışmalarında mevcut nüfus eşiği ve insan hareketlilik kalıplarına dayanarak, düşük yoğunlukta ilk büyüme ve daha yüksek yoğunlukta doygunluk ile uygun bulaşma biçimini tanımlamak için bir mekânsal temas modeli formüle etmişlerdir. İki mekanizmanın, tüm ölçeklerde gerçek nüfus hareketini yakalamayan aşırı durumlar olduğunu göstermiştir. İnsanlardaki ve çevresel yaban hayatındaki çeşitli bulaşıcı hastalıklarının elde edilen deneysel verileri, bütün bu odaklanılan çerçeveye bakıldığında matematiksel olarak doğrusal olmayan fonksiyonel bir sistemin daha iyi sonuçlar elde edeceğini göstermektedir.

(Poletto et al., 2013) çalışmalarında göçebe toplulukların zaman içerisinde geçmişteki kökenlerini hatırladıkları ve göçleri sırasında gidecekleri hedef noktalarında zamansal olarak karmaşık bir yapıya sahip dağıtılmış karma bir zaman aralığı harcadıkları, karmaşık bir zincir popülasyonu ağı üzerindeki sisteme ait salgın süreçlerinin matematiksel ve hesaplamalı bir çalışmasını sunmuştur. Yapılan çalışmada matematiksel hesaplamalar ve sayısal simülasyonlar kullanılarak, konaklamaların yapıldığı yerlerdeki konaklama sürelerinin heterojen bir şekilde dağılmasının bölgedeki yerel salgın ve yaşanacak olan çeşitli küresel istilalar arasındaki eşik değerini ne kadar değiştirdiğini ve ayrıca yaşanacak küresel bir salgın durumunda da sistemin salgın davranışını nasıl değiştirdiğini göstermiştir. Bunlara ek olarak, birde çalışmaya ait teorik çerçevelerin, enfekte olmuş olan bireylerin yaşadıkları ev ve ya barınma yerlerini terk etmedikleri bir senaryoyu göz önünde bulundurarak simülasyonu çalıştırmış ve elde ettikleri sonuçlar ile salgının sonucunda toplumdaki hasta bireylerin seyahat etme davranışındaki değişikliklerin etkisini incelemelerine yardımcı olmuştur. Son olarak, çalışma esasları bakımından Markovyen olmayan simülasyon çerçevelerinin sonuçlarını standart olarak bilinen bir Markovyen yaklaşımla elde edilmiş olan simülasyona ait sonuçlarla karşılaştırmış ve salgına ait yayılım potansiyeline ek olarak salgının yayılma zamanlaması ve sistem içerisindeki mekânsal yayılım modelinin tahmine ilişkin ikili kıyaslama yapılmış, sonuçlara ait ilgili farklılıklar bulunmuştur.

(Dafilis et al., 2014) çalışmalarında, daha önce boğmaca incelemek için kullanılan bir enfeksiyon modelinin mevsimsel olarak zorunlu bir uzantısının dinamik özelliklerini ayrıntılı olarak incelemiştir. Model, maruz kalma ile yeniden enfeksiyona karşı koruma süresi arasındaki etkileşimi yakalayan doğrusal olmayan bir geri besleme terimi içermesi bakımından yeni sayılmıştır. Yapılan çalışma sayısal simülasyon ve çatallanma analizinin karma sistemli bir karışımı ile, sisteme ait parametre uzayının karmaşık bölgelerinin sayısal kökenlerini tanımlamış ve çeşitli yorumlarla açıklamıştır. Ayrıca, düğüm çizgilerinin ve farklı yörünge

periyotlarının periyot katlama basamaklarının üst üste geldiği bölgeleri tanımlamıştır. Çalışma içerisinde gerçekleştirilen bu süreçler sistemin kendi içerisindeki parametrelerinde meydana gelen kayde değer nitelikteki küçük bozulmalara karşı özellikle sistemin hassas olduğunu ve iyi derecede kararlı bir sistem davranışına eğilimli olduğunu göstermiştir.

(Reiner Jr et al., 2014) çalışmalarında sosyal ve toplumsal olarak etkili bir şekilde yapılandırılmış bir salgın hareketinin DENV adı verilen salgın iletimi üzerindeki etkisini, mekansal ve fiziksel olarak açık modellenmiş ve aracı temelli bir yayılım modeli kullanarak araştırmıştır. Bireysel hareketler sosyal gruplar içinde yüksek derecede örtüştüğünde, kuzeydoğu Peru'da dang hummasına endemik olarak tespit edilenlere benzer enfeksiyon kalıplarını yeniden oluşturmuşlardır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar sosyal mesafenin sivrisineklerin yayılımının hızına karşı gerçeği yansıtacak bir sonuç olan DENV salgın iletimi hızında ayrıntılı heterojenlik yönlendirmesi hipotezi ile aynı doğrultuda çıktığını göstermiştir. Sosyal olarak yapılandırılmış hareketlerin neden olduğu bulaşmadaki bu heterojenliğin, kümelenmiş enfeksiyon dinamiklerinde sivrisinek yayılımının yaygın etkisi tarafından gizlendiği ortaya çıkmıştır.

(Fu et al., 2015) çalışmalarında dünya üzerindeki devletlere ait hükümetlerin ülkeleri için kentleşme ve düşük karbonlu yerleşim bölgelerine yönelik olarak gerçekleştirmiş oldukları acil çağrılara yanıt olarak, bu çalışma kapsamında küresel çapta kullanılan enerji ile ilgili karbondioksit emisyonlarının kullanıldıkları çevre açısından dinamik olarak değişme eğilimini tahmin etmiş ve yapılan çalışmalar neticesinde STIRPAT ve STIRPAT kombinasyonuna dayalı çevresel çapta bir düşük karbonlu kalkınma senaryosu seçmişlerdir. Yaptıkları bu çalışmayı Wanquan kasabası gibi küçük ve daha düşük ölçekli bir çalışma alanında 2015 ve 2020 yılları arasındaki zaman dilimi için SD temelli bir simülasyon çalışması şeklinde uygulamaya koymuşlardır.

(Rao & Kumar, 2015) çalışmalarında oluşturulan sistem içerisindeki duyarlı, enfekte ve iyileşmiş kişi popülasyonları ile toplumun diğer bireylerine yayılan bulaşıcı hastalıklar için yeni bir simülasyon modeli önerilmiş ve kuluçka süresindeki gecikmeler ile bulaşıcı hastalığın sistemdeki popülasyonda tekrarlanması durumunda salgın hastalığa ait dinamikleri incelemiştir. Sistem içerisinde bulunan dinamiklere ait tedavi ve aşılama çabalarının, zaman içerisinde göstermiş olduğu sistem gecikmelerinin olguğu enfeksiyonun popülasyon içerisinde yayılması üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çeşitli durumlarda dengenin yerel kararlılığı ve kararlılığın değişmesi için yeterli koşullar türetilmiştir. Modelin önemli bir özel durumu için küresel kararlılık sorunu incelenmiştir. Gelişmiş aşılama bile kuluçka gecikmelerinin sistem üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma, eradikasyonun ancak aşılama ile

yapılabileceğine dair yaygın inanışla karşılaştırıldığında, zaman gecikmesi olsa bile tedavi oranının hastalığı kontrol altına alacağı gerçeğini açıkça ortaya koymuştur.

(Sahu & Dhar, 2015) çalışmalarında hastalıksız ve benzersiz bir endemik denge olmak üzere iki denge sergilemişlerdir. Hastalıksız ve endemik dengelerin varlığı ve yerel stabilitesi, etkin üreme sayısı R_0 açısından araştırılmıştır. Medya kapsamının etkili üreme sayısını etkilemediği, ancak endemik kararlı durumdaki bulaşıcı bireylerin sayısını azaltarak ve ayrıca enfeksiyon zirvesini düşürerek hastalık yükünü hafifletmeye yardımcı olduğu görülmektedir. Medya kapsama katsayısını tahmin etmek için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Merkezi manifold teorisinin sonuçları kullanılarak, R_0 birlikten geçerken sistemde transkritik çatallanmanın meydana geldiği ve benzersiz endemik dengenin asimptotik olarak kararlı olduğu tespit edilmiştir. Karantina ve izolasyonun nüfus düzeyindeki etkisinin, izole edilmiş bireyler tarafından bulaşma düzeyine bağlı olduğu görülmektedir. Ayrıca, popülasyonda önceden var olan bağışıklığın daha yüksek seviyesi, enfeksiyon zirvesini azaltmış ve erken gelmesine neden olmuştur. Teorik bulgular sayısal simülasyon ile desteklenmektedir. Model parametrelerine göre endemik kararlı durumda R_0 ve durum değişkenleri için duyarlılık analizi yapılmıştır.

(Moualeu et al., 2015) çalışmalarında tüberkülozun eğitim, teşhis kampanyası ve latent olarak enfekte olmuş kemoprofilaksi yoluyla optimal kontrolünü ele almıştır. Teşhis edilmemiş bulaşıcı, teşhis edilmiş bulaşıcı, geç enfekte ve görme kaybı bulaşıcı gibi önemli bileşenleri içeren bir matematiksel model formüle edilmiştir. Kamerun popülasyonunda tüberküloz endemik kaldığında hükümetin harcadığı para miktarını en aza indirmeyi amaçlayan Pontryagin'in maksimum ilkesi, optimal kontrolü karakterize etmek için kullanılmıştır.

(Wang et al., 2017) çalışmalarında rastgele ağlarda kuluçka döneminde bulaşıcı kuvvet içeren veya içermeyen SEIR dinamiklerini ayrıntılı olarak ele almış ve analiz etmişlerdir. Çalışmada çeşitli olasılık üretim fonksiyonları ile çalışmada kullanılan simülasyon modellerinin her birine ait üç boyutlu adi diferansiyel denklem modeli doğrusal olmayan simülasyon çalışması yapılmıştır. Kuluçka döneminde bulaşıcı gücü olmayan SEIR modeli için, kuluçka periyodu uzunluğunun temel üreme sayısı ve nihai salgın boyutu üzerinde hiçbir etkisi olmamasına rağmen, tepe noktasının varış zamanı ve tepe boyutu üzerinde büyük etkisinin var olduğunu tespit etmişlerdir. Modelde hastalığın kuluçka döneminde bulaşıcı olma özelliğine sahip olan bir SEIR modeli, sistemin kuluçka periyodu temel üreme sayısını ve bunun bir sonucu olarak simülasyondaki salgın hastalık boyutunu da etkilemektedir. Simülasyon sonuçları, ilk enfeksiyonlardan bağımsız olarak, model tahminlerinin topluluk ortalaması ile iyi bir şekilde uyuştuğunu göstermiştir.

(Leung et al., 2017) çalışmalarında elde edilen gözetim verilerinden AVR sistem uygunluğunu tahmin etmek için simülasyon temelli basit bir yöntem geliştirmiştir. AVR yapılarının uygunluğunu, birlikte dolaşan AVS muadillerine göre üreme sayıları olarak tanımlamıştır. Gözetim verilerinden AVR uygunluğunun gerçek zamanlı tahmini için basit bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmada geliştirilen bu yöntem, sisteme ait hastalığın iletim dinamikleri ile ilgili diğer bazı özel ayrıntılara gerek duymadan sadece sisteme ait olan üretim süresi hakkında bilgi gerektirmektedir. Kullanılan bir çok salgın senaryosunda olduğu gibi tarafsız ve gerçeği yansıtan çeşitli uygunluk tahmin değerleri verdiğini göstererek bu yöntemin çalışma prensibini doğrulamak için ilk önce simülasyonları kullanmışlardır. Daha sonra kullanılan bu yöntemi geriye dönük gerçek boyutlu verilerle güçlendirilmiş iki adet vaka çalışmasına ve bir tane de varsayımsal vaka çalışmasına uygulamışlardır. AVS ve AVR yapılarını birlikte dolaşımı ile bir pandemi sırasında büyük ölçekli antiviral müdahaleler olması durumunda, yöntemin içsel AVR uygunluğunu ve AVS yapısı üzerindeki ilaç basıncını izleyerek antivirallerin optimum kullanımını bilgilendirmek için kullanılabileceğini göstermişlerdir.

(Levy et al., 2017) çalışmalarında sağlık eğitiminin neden olduğu davranış değişikliğinin bir salgının dinamikleri üzerindeki rolünü değerlendirmek amacıyla halk sağlığı eğitimi varlığında Ebola virüsü hastalığının dinamiklerini incelemiştir. Davranış değişikliğinin gücü, Sudan'da sadece 3 yıl arayla meydana gelen iki EVH salgınında açıkça görülmüştür. Bunlardan ilki olan olay, kanıtlanmış ilk EVH salgını olarak literatüre girmiş ve sayıca göz ardı edilmeyecek kadar enfeksiyon üretmiştir. Elde edilen veriler ve tahminler ışığında bölgedeki nüfus gerçekleşen ilk salgından nasıl bir tepki vereceğini öğrendiği için yaşanan ikinci salgın sayısal olarak çok daha az vaka üretmiştir. Bu iki zıt davranışı modellemek için bir adi diferansiyel denklem sistemi türetmişlerdir. Çalışmanın seyri içeririsinde Sudan'daki potansiyel nüfus ilk EVH salgınından nasıl bir tepki vereceğini öğrendiği ve ayrıca ikinci salgından önce de davranışlarını değiştirdiği için, bu iki zıt davranışla sistemdeki ilgili parametreleri tahmin etmek için yaşanmış bu iki EVH örneğinden elde edilen verileri kullanmışlardır. Daha sonra hastalığa açık olan bu iki popülasyonu içerisinde barındıran simülasyon modelini kullanarak Sudan'da gelecek zamanda bir EVH salgınına gerçekleşmesi durumunda toplumdaki gerçekleşecek olan salgın olayını simüle etmişlerdir.

(Wang et al., 2018) çalışmalarında modellerinde kullanmış oldukları çeşitli ekonomik politikalar altında küresel çaptaki su kaynağı kıtlığının çevresel sonuçlarını ve ekonomik etkilerini incelemiştir. Fakat bilindiği gibi böyle bir modelin geliştirilmesi için bir sistem perspektifinde kullanılacak olan değişken araçları ve bu değişkenlere ait çeşitli sektörler ile

birlikte ele alınan karmaşık bi simülasyon modeli gerekmektedir. Planlanan bu çalışma ve tasarımı gerçekleştirebilmek için, çalışmada modellenmesi planlanan alternatif ekonomik politikaların su kullanımı ve fiyatlandırması üzerindeki çevresel ve ekonomik etkisini simüle eden ajan tabanlı bir model (ABM) ve SD modellerini birleştirerek karmaşık bir sistem modeli oluşturulmuştur. Ayrıca tasarlanan bu model, çalışmanın yapılacağı bölgedeki bir takım yerel su kaynaklarının taşıma kapasitesini temsil edecek olan su taşıma kapasitesi kısıtını da dikkate almıştır.

(Tan et al., 2019) çalışmalarında, küresel çapta düşünülen doğal ekosistem peyzaj dinamiklerinin modellenecek olan simülasyonu sırasında iklimsel etkileri ve insan faaliyetlerini dikkate almak için sistem dinamiklerini, MaxEnt (SD-MaxEnt-CA modeli olarak adlandırılır) ve hücresel otomata modellerini birlikte tasarımıyan entegre bir simülasyon çalışması yapmışlardır. Oluşturulan bu entegre modelde, yukarıdan aşağıya doğru ve aşağıdan yukarıya doğru sırasıyla SD modeli ve CA modelinin etkileşimli olarak birleştirilmesi ile elde edilmiş bir MaxEnt süreci tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında yapılan bu modeller arası etkileşim, tasarlanan gelen modelin iklimin etkileriyle birlikte simülasyonun çalıştırılması sırasında her katmanın kendi ağırlıklarını ve kendine has geçiş kurallarını doğru ve eksiksiz bir şekilde elde etme yeteneğini geliştirmesini sağlamıştır. Tasarlanan model, dünyanın en gelişmiş ve korunaklı olduğu bilinen 34 biyoçeşitlilik noktasından biri olan Xishuangbanna'da 2000'den 2010'a kadar tarımda kullanılmış olan tarım arazilerinin, çeşitli çay bahçelerinin ve bazı kauçuk plantasyonlarının genişlemesinin neden olduğu ve o bölgedeki doğal ormanın ne yazık ki peyzaj bozulmasını simüle etmek için uygulanmıştır.

(Ibarra-Vega, 2020) çalışmalarında Sistem Dinamiği metodolojisi ile matematiksel bir model oluşturulmuştur. Hastane kapasitesini, temasları, enfekte kişilerle temasları, ölümleri, sonuç olarak dört stok değişkenli bir modele yardımcı ve durum değişkenlerinin eklenmesiyle bir SIR modeli tasarlamıştır. Benzer şekilde, parçalı işlevler kullanılarak, “karantinaları” veya kilitlenmeleri ve temaslardaki azalmanın etkinliğini modellemek mümkün olmuştur. Sonuçlar, karantinalar nedeniyle enfekte olan kişilerde azalma olduğunu göstermiştir. Model 100.000 kişilik bir nüfus için simüle edilmiştir. Simülasyonlar, üç farklı senaryoda meydana gelebilecek bulaşma eğilimlerini göstermektedir: A) bir uzun süreli kilitlenme (60 gün), B) 30 günlük akıllı kilitlenme alanıyla birlikte 30 günlük iki orta süreli kilitlenme ve C) ilk 40 günlük kilitlenme ve ardından 30 günlük akıllı kilitlenme şeklinde uygulanmıştır. Tüm kilitlenmeler, bildirilen ilk enfeksiyondan sonraki 25. günde başlamıştır. Model, COVID-19 salgınının kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına ve başarılı bir şekilde yakalanmasına yönelik kompakt bir yapı sunmuş

ve bu nedenle salgın eğilimleri hakkındaki bilgileri ve enfeksiyonu azaltmada karantina etkinliğini geliştirmek için bir genel bakış sağlamıştır.

(Varotsos & Krapivin, 2020) çalışmalarının amacı, COVID-19 yayılımını belirlemek ve tahmin etmek için çok daha etkili bir yöntem geliştirerek toplum içerisindeki salgın hastalığa ait virüsü azaltmak ve durdurmak için sistem içerisinde entegre edilmiş çeşitli kontrol önlemlerinin etkinliğini ve nasıl çalıştığını değerlendirmektir. Sistem içerisindeki olasılıksız kesin bileşenler, elde edilen bazı veriler tarafından belirlenmiş olan simülasyon parametreleri ile bir matematiksel denklem sistemi kullanılarak sayısal veriler ışığında tanımlanmıştır. Sistem içerisinde bulunan olasılıklı bileşenler ise, COVID-19 salgın hastalık yayılma eğilimini genel olarak şekillendiren bir düzensizlik göstergesi olarak kabul edilmektedir. Çalışma içerisinde oluşturulmuş olan çeşitli simülasyon deneyleri, karar verve sistemine ait bazı simülasyon tahminleri ile Rusya ve Yunanistan'da salgın hastalığa ait rapor edilen çeşitli veriler arasında iyi derecede bir uyum olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak yapılan bu analiz, daha henüz yeni tanıtılmış olan bu düzensizlik göstergesinin henüz meselenin başındayken ortaya çıkabilecek bir pandemiye ait dinamiklerin habercisi olabileceğini göstermiştir. Son olarak bu gelişmeler ve çalışmalar ışığında, sonuçlar ikinci bir COVID-19 hastalığına ait salgın dalgası için üç büyük ülkeyi potansiyel aday olarak işaret etmiştir: bunlar nüfus yoğunlukları yüksek olan ABD, Rusya ve Brezilya ülkeleridir.

(Shah et al., 2020) çalışmalarının amacı dünyada hızla yayılan COVID-19 salgınına yanıt olarak Amerika Birleşik Devletleri hükümeti tarafından uygulanan bazı eyaletler arası ve yurtdışı seyahat yasaklarının ve söz konusu toplum içerisinde uygulanan belli başlı halk sağlığı müdahalelerinin etkisini değerlendirmektir. Doğrusal olmayan bir diferansiyel denklem sistemi formüle edilmiş ve temel yeniden üretim sayısı R_0 hesaplanmıştır. Herhangi bir hafifletme önlemi olmadan, nüfusun bulaşıcılığı ve ardından hastaneye yatışlar artmıştır. Eyaletler arası ve yabancı seyahat kısıtlandığında ve nüfus karantina altına alındığında, maruz kalma ve ardından enfeksiyon olasılığı önemli ölçüde azalmış; ayrıca, iyileşme oranı önemli ölçüde artmıştır. Pandemiyi etkin bir şekilde kontrol etmek için karantinaya ek olarak eyaletler arası ve yurtdışı seyahat kısıtlamaları gerekmektedir.

(Shahrear et al., 2021) çalışmalarında Bangladeş merkezli COVID-19 için modifiye edilmiş bir SIR modeli üretmiş ve analiz etmiştir. Modeli teorik olarak sayısal simülasyonlarla birlikte incelemişlerdir. Yeni nesil matris yöntemi kullanılarak çoğaltma sayısı (R_0) hesaplanmıştır. Temel üreme sayısı nedeniyle, hastalıksız ve endemik dengeler için modelin yerel kararlılığını analiz etmişlerdir. Reprodüksiyon sayısının parametrelere duyarlılığını araştırmış ve parametrelerin baskınlığını belirlemek için duyarlılık indekslerini

hesaplamışlardır. Ayrıca, dördüncü dereceden Runge–Kutta (RK4) yöntemini kullanarak sistemi MATLAB'da simüle etmiş ve sonuçları dördüncü dereceden polinom regresyonunu kullanarak doğrulamışlardır.

(Scabini et al., 2021) çalışmalarında düğümlerin insanları, kenarların sosyal temasları ve katmanların farklı sosyal etkinlikleri temsil ettiği çok katmanlı karmaşık bir ağ kullanarak COVID-19 salgınına modellemek için yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Model, geleneksel SIR'yi geliştirmiş ve 26.05.2020 tarihine kadar olan verileri dikkate alarak Brezilya salgınına incelemek ve gelecekteki olası eylemleri ve bunların sonuçlarını analiz etmek için uygulanmıştır. Ağ, enfeksiyon, ölüm ve hastanede kalış süresi istatistikleri kullanılarak karakterize edilmiştir. İzolasyonu, sosyal mesafeyi veya ihtiyati önlemleri simüle etmek için katmanları kaldırmış ve sosyal temasın yoğunluğunu azaltmışlardır. Sonuçlar, çeşitli iyimser varsayımlar alınsa bile, Brezilya'daki mevcut izolasyon seviyelerinin sağlık sistemi için kritik bir senaryoya ve önemli bir ölüm oranına (ortalama 149.000) yol açabileceğini göstermiştir.

(Salman et al., 2021) çalışmalarında basit bir globalleşmiş sistem sınıfı kullanarak Malezya toplumu içerisinde COVID-19 pandemisi için simülasyon temelli bir senaryo analizi yapmıştır. SIR sistemi ve uzantılarına ek olarak yeniden enfeksiyon sorunları ve sınırlı tıbbi kaynak senaryoları yoluyla geçici bağışıklığın dahil edilmesi ile SIRS tipi modele geçilmiştir. Bu sistem, COVID-19 pandemisinin uzun vadeli sonuçları hakkında daha fazla bilgi sağlamak için kullanılmıştır. Bir vaka çalışması olarak, bu sistemin bazı epidemiyolojik parametrelerinin, modelin Sağlık Bakanlığı tarafından yayınlanan gerçek COVID-19 verilerine uydurulmasına dayalı olarak tahmin edildiği Malezya'daki günlük teyit edilen vakalar kullanılarak COVID-19 bulaşma dinamikleri araştırılmaktadır. Bu modelin Malezya'daki COVID-19 pandemisinin enfeksiyon yörüngelerinin eğilimini taklit edebildiğini ve bulaşma dinamiklerinin yeniden enfeksiyon gücünden ve sınırlı tıbbi kaynak sorunlarından etkilenmesinin mümkün olduğu gözlemlenmiştir.

(Gebremeskel et al., 2021) çalışmalarında Etiyopya'daki hastalığın bulaşma dinamiklerini tahmin etmek için COVID-19'un bölümsel bir salgın modelini önermiş ve analiz etmişlerdir. Analitik olarak, temel çoğaltma sayısı belirlenmiştir. Sonuçlar, temel çoğaltma sayısı birden küçükse DFE'nin kararlı olduğunu ve aksi takdirde kararsız olduğunu göstermiştir. Ayrıca, çalışmada oluşturulmuş olan varsayımlar üzerine inşa edilmiş salgın modeline ait parametreleri, Etiyopya'dan Mart ve Haziran 2020 tarihleri arasında yaklaşık üç ay boyunca elde edilen gerçek COVID-19 verileri kullanılarak tahmin edilmiştir. Çalışmadaki sayısal simülasyon sonuçları, önerilen salgın modelinin Etiyopya'daki gerçek COVID-19 pandemi verileri için uygun olduğunu göstermektedir. Özellikle sayısal simülasyona ait

sonuçlar, hastalığın en tehlikeli parametresi olan bulaşma hızındaki en küçük bir artışın, hastalıktan kaynaklı enfekte olmuş bireylerin sayısında önemli derecede bir artışa yol açtığını göstermektedir. Bu nedenle, sayısal simülasyon sonuçlarının, sistemin duyarlılık sonuçları ile uyumlu olduğunu tespit etmişlerdir.



MATERYAL ve YÖNTEM

Simülasyon Kavramı

Simülasyon, karmaşık sistemleri temsil etmek, olayların gerçekleşmeden önce denemesini yapmak ve incelemek için kullanılan yöntemleri, araçları ve teknikleri içeren bilgisayar temelli uygulama alanıdır. Simülasyon araçları ve simülasyon teknikleri geçtiğimiz yıllarda büyük ilerlemeler göstererek birçok farklı ve daha zorlu alanlarda daha fazla uygulanmaya başlanmıştır (Scheidegger et al., 2018).

Simülasyon, oluşturulan modelleri bütünsel bir bakış açısı ile incelemek veya çok sayıda hedefe dayalı bir modeli gerçek hayat parametreleri ile birlikte denemek için kullanılan özel bir yaklaşımdır. Simülasyon modelleri, gerçek dünya üzerindeki sistemlerin belirli bir kapsamda bilgisayar ortamında gerçek veriler ışığında nasıl çalıştığının bilgisayar temsilleridir.

Simülasyon genel hatları ile zamanın yönetimi açısından en etkin ve maliyetin minimum harcanması açısından en etkili yöntemdir. Birçok kez olaylar içerisindeki nedensel etkileri belirlemenin, olay örgüsü içerisindeki kritik parametre tahminlerini belirlemenin ve sistemdeki süreçlerin zamana bağlı olarak nasıl geliştiğini ve hangi doğrultuda gerçekleştiğini açıklamanın neredeyse tek yoludur (Garson, 2009).

Simülasyon modelleme yazılımının kullanımı için genellikle üç farklı görüş oluşmuştur: olay planlama, süreç etkileşimi veya etkinlik taraması. Bu üç görüşün adlarından da anlaşılacağı gibi, bu üç görüşün her biri esas odak noktası olarak sırasıyla bir simülasyon sistemindeki gerçekleşen olaylara, süreçlere veya faaliyetlere göre odak noktasını belirler. Bir olayın simülasyonu için programlama perspektifini takip ederken, simülasyona ait bir model geliştirici, sistem içerisinde herhangi bir olay meydana geldiğinde sistem içerisinde meydana gelen bu modelin çalışma mantığını ve sistem içerisindeki durumlara ait değişiklikleri tanımlamalıdır (Carson, 2004).

Simülasyon modeli, gerçek hayat içerisinde alınmış bir sürecin veya sistemin belirli şartlar altında birçok parametre ve değişken kullanılarak tanımlandığı bir modeldir ve genellikle oluşturulan bu modelin yapılandırılabilir olmasına, yani olay içerisindeki bir dizi farklı sistem veya süreç değişikliğini temsil etmesine izin veren birtakım simülasyon parametreleri içerir. Bu olay için bazı basit örnekler, modellenen sistemi yöneten bir kullanıcının model içerisinde oluşturulan bir iş istasyonundaki işçi sayısını, model içerisindeki bir makinenin veya aracın hızını, model içerisindeki bir konveyör kontrol sisteminin olaylar karşısındaki zamanlama

özelliklerini vb. değiştirmesine, bir takım ekleme ve çıkarmalar yapmasına izin veren simülasyon parametrelerini içerir.

Simülasyonun Tarihi

Simülasyon tarihi, geçmişe dönüp bakıldığında dijital bilgisayarinkinden yaklaşık olarak 200 yılı aşkın bir süre öncesine dayanmaktadır, ancak bu kapsamda kullanılan genel amaçlı elektronik bilgisayarın ortaya çıkışı, simülasyon tarihi için bir başlangıç sayılan Monte Carlo simülasyonunu insan yoğunluklu, aşırı talepkâr olan matematiksel bir problem çözme tekniğinden çok daha verimli, geniş çapta bir çok farklı alan içerisinde uygulanabilir ve son derece popüler olan evrensel düzeyde etkili bir alana dönüştürdü (Nance et al., 2013).

Simülasyonun tarihine yönelik bu çalışmalara ek olarak, bu önemli simülasyon tarihinin sistematik olarak doğru bir şekilde arşivlenmesi için çok daha geniş çaplı bir çalışma yürütülmüştür. 1990'ların sonlarında, Robert G. Sargent, bilgisayar simülasyonu alanındaki öcü olan kişilere ait çeşitli kitaplar, makaleler ve kaydedilmiş röportajlar için ana depo olarak kullanılması planlanan büyük bir üniversite kütüphanesinde barındırılacak olan bir Simülasyon Arşivi fikrini tasarladı. Simülasyon Arşivi, 1998 yılında James R. Wilson'ın yardımıyla Kuzey Karolina Eyalet Üniversitesi (NCSU) Kütüphanelerinde büyük emeklerle kuruldu ve bu Arşivi desteklemek için bir vakıf 2007 yılında Robert G. Sargent tarafından gösterilen büyük çaba ve katkılar ile kurulmuştur.

Simülasyonun Amacı

Gerçek hayat içerisindeki birçok sisteme ait girdi ve çıktıları çeşitli parametre ve değişkenler kullanarak matematiksel açıdan tanımlamak, oluşturulan benzetim sistemini parametre ve değişkenlerle kurulmuş olan gerçek model üzerinden tanımlayıp araştırmak, çeşitli karar ve stratejilerle senaryoları gerçek sistem içerisinde herhangi bir farklı müdahaleye gerek kalmadan bilgisayar ortamında deneyebilmek ve çeşitli çıkarımlarda bulunmak simülasyonun amacıdır(Koçonali, 2009).

Simülasyon çalışmalarının literatür içerisinde yapılmış ve çalışma prensipleri kanıtlanmış olan birçok amacı vardır. Fakat bu amaçların hepsinden ayrıntılı olarak bahsetmek hem bu çalışmanın kapsamınca hemde zamansal olarak pek mümkün değildir. Bu nedenle aşağıdaki bazı önemli ve öne çıkan simülasyon faydalarını genel olarak söyleyebiliriz (Öztemel, 2009);

* Simülasyon modelleri oluşumundaki bazı karmaşık sebeplerden dolayı kesin olarak çözümü mümkün olmayan sezgisel problemlerin çözümünde genel olarak etkin bir şekilde

kullanıldığı için sezgisel olayların daha kolay ve anlaşılır bir şekilde modellenmesini ve yorumlanmasını mümkün kılmaktadır.

* Modellenmesi ve tasarımı çok karmaşık olan bazı gerçek hayat sistemlerinin davranışları çeşitli simülasyonlar ile daha basitleşt hale getirilerek incelenebilir. Bu da bizlere simülasyonla çözülmüş olan bir sistemin gerçek hayatta, karşılaşma ihtimalimizin yüksek olduğu konu ayırt etmeden bir çok farklı olay ve işleyiş hakkında yorum yapabileceğimiz ve değerlendirmede bulunabileceğimiz çeşitli öngörüler yapılabilmemize olanak tanır.

* Bir olay bilgisayar ortamında veya çeşitli simülasyon modelleme ortamlarında modellendikten sonra oluşturulmuş olan sistemin öngörülmesi beklenen bir çok davranış simülasyon yardımı ile izlenebilir. Ayrıca modelde kullanılan çeşitli parametre ve değişkenler olayların akışına göre değiştirilerek gerçekleşmesi beklenen farklı durumlara göre sistemin nasıl ve ne ölçüde tepkiler vereceği konusunda bizlere çeşitli fikirler üretilebilir.

* Simülasyon ortamında geliştirilecek olan gerçek hayat örnekleri ile bu sistemde kullanılacak alternatif senaryolar oluşturulup bu senaryolara ait bazı sonuçlar için çeşitli denemeler yapılabilir.

* Yaşadığımız gerçek hayat olayları ve oluşturulması istenen çeşitli sanal sistemler hakkında simülasyon teknolojisinden ve simülasyon alt yapıli bilgisayar destekli programlardan yararlanılabilir.

Simülasyonun Avantaj ve Dezavantajları

Simülasyon, tasarlanan herhangi bir sistemin modelinin kurulmasına ve sonuçları istenen model için birçok farklı senaryo üzerine çeşitli deneylerin yapılmasına izin verir. Elinizde herhangi bir model örneği olmadan, ya gerçek hayattan alınmış bir sistemle denemeler yaparsınız ki bu muhtemelen sistem içerisinde büyük kesintilere ve problemin çözümüne varışta aksaklıklara neden olur, ya da tasarlanacak model için bu tür bir deney ve analiz yapmadan ortaya çıkması muhtemel bazı potansiyel risklerle çalışmaya devam edersiniz.

Simülasyon, tasarlanması istenen herhangi bir sistemi oluşturmada önce veya modelde kullanılan bazı değerleri değiştirmeden önce modellenecek olan problemlerin, darboğazların ve modele ait tasarımdaki eksikliklerin belirlenmesine olanak tanır.

Simülasyon, simüle edilmesi istene birçok alternatif tasarımın ve bu tasarımlara ait çalışma kurallarının karşılaştırılmasını ve sonuçlarının yorumlanmasını sağlar. Tasarımı

yapılacak olan herhangi bir projeye kaynak ve yatırım tahsis etmeden önce bu projenin oluşum aşamasındaki problemler için çeşitli değerlendirme ve karşılaştırmalar yapılabilir.

Simülasyona ait yukarda saydığımız bu avantajların yanı sıra, simülasyonlar tasarımlarının gerçekleştirilmesi ve uygulamaya geçilmesi hususunda genellikle zaman alıcıdır. Simülasyonda kullanılan çeşitli veriler bazen mevcut olmayabilir veya bu verilerin elde edilmesi maliyetli olabilir ve elde edilen sonuçlara bağlı olarak karar vermeden önce mevcut olan zaman güvenilir bir çalışma için yeterli değildir.

Simülasyonu sıkça kullanan bazı şirketlerde, simülasyon çalışmaları ile elde edilen erken bir başarı, eldeki kullanılan proje için haklı olsun ya da olmasın, simülasyonun şirket içerisinde yapılan her projede bir “kontrol listesi” ögesi haline gelmesine dönüşmüştür.

Bazı durumlarda, projelerin kapsamı için istenen animasyonlar ve diğer görsel gösterimler, tüm projelerde gerçekleşmesi mümkün olan zaman baskısı ile birleştiğinde, simülasyonu kullanan karar vericileri yetersiz kanıtlara ve kesin olmayan bilgilere dayalı olarak olması gerekenden daha erken sonuçlara götürebilir.

Simülasyonlar için bahsedilen bu dezavantajlara ek olarak, henüz yeterince deneyimi olmayan simülasyon analistleri veya simülasyon yazılım ve teknolojisine olması gerekenden çok daha fazla odaklanmış olan kullanıcılar tasarlamak istedikleri herhangi bir modele çok fazla ayrıntı ekleyebilir ve modelin gelişimi sürecinde olması gerekenden çok daha fazla zaman harcayabilir. Bu nedenle proje kapsamında tasarlanan modelin orijinal hedeflerinin ve proje oluşumundaki zaman çizelgelerinin unutulmasına neden olur. Bu genellikle simülasyonu kullanan yönetimin simülasyonun umut verici ve ilginç bir teknoloji olmasına rağmen tasarladıkları çoğu proje için çok fazla maliyetli ve olması gerekenden çok daha fazla zaman alıcı olduğu sonucuna varmasına yol açar(Carson, 2004).

Simülasyonun Uygulama Alanları

Simülasyon literatüre bakıldığında bir çok uygulama alanı olan bir yöntemdir. Bu alanların başında askeri alanlar, çeşitli sosyal hayat konuları, neredeyse fen bilimleri ve mühendisik bilimlerinin tamamında ve en önemlisi ve son zamanların en dikkat çeken konularından biri olan sağlık üzerine yapılan çalışmalar simülasyonun uygulama alanlarıdır.

Simülasyona ait uygulama alanları aşağıdaki çeşitli başlıklara göre çeşitlendirilebilir.

Temel Bilimlerde Teorik Problemlerin Çözümünde:

- Matrislerle yapılan hesaplamalarda,
- Eğrinin altında kalan alan hesabında,

- Kısmi diferansiyel işlemlerde,
- Doğrusal eşitlikleri hesaplamada.

Sosyal Bilimlerdeki Uygulama Alanları;

- Üretim sistemlerinin analizi ve tasarımı,
- İşgücü planlaması,
- Montaj hattı dengeleme,
- Malzeme taşıma sistemleri,
- Stok planlamada sipariş planlarının incelenmesi,
- Finansal planlama,
- Pazar araştırması,
- Sermaye bütçelemesi,
- Nüfus hareketlerine bağlı tahminlerin yapılması, çeşitli popülasyonlar içerisindeki birey ve grup davranışlarının analiz edilmesi gibi bir çok sosyal bilimlerle alakalı problemlerin çözümünde kullanılır.

Simülasyon Modellerinin Sınıflandırılması

Simülasyon modelleri, olası herhangi bir sistemin çeşitli yöntemlerle gösterilmesidir. Diğer bir ifadeyle, gerçek hayat problemlerindeki bir olayın veya karmaşık bir sistemin daha basit hale getirilerek basitleştirilmesi ve çeşitli modelleme elamanları vasıtası ile kavramlaştırılması olarak tanımlanabilir.

Çözüme kavuşturulmak istenen bir sistemin simülasyon modeli oluşturulmadan tasarlanan o sistemi simüle ederek sonuç elde etmek mümkün değildir. Bu nedenle öncelikle çözülmesi gereken problemie ait sistemin çalıştırılmak üzere simülasyon modeli kurulur. Daha sonra analiz edilerek tasarlanan bu sistem çeşitli simülasyon verileri kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılır ve deneysel veriler ışığında çalıştırılır. Probleme ait gelişebilecek farklı durumlar için probleme ait tasarlanmış olan sistem davranışları izlenerek sistem kurucusu niteliğindeki karar vericiye alacağı kararları için çeşitli bilgi ve destek verilir.

Simülasyon modelleri tasarlanacağı konuya ve uygulama alanının farklılığına göre kesikli – sürekli, statik – dinamik, stokastik – deterministik olmak üzere üç farklı başlık altında incelenmiştir.

Kesikli ve sürekli simülasyon modelleri

Kesikli modellerin simülasyonu sistemlerin içerisinde barındırdığı çeşitli olaylara dayalıdır. Sistem içerisindeki her simülasyon döngüsünde zaman boyutu en küçük olan bir olay işlenir ve sistem içerisinde bu olaya duyarlı diğer işlemler yürütülür. Bu, sistem içerisinde birbirini etkileyen ve diğer işlemlerin yürütülmesine neden olan başka olayları da oluşturabilir. Sistem içerisindeki geçerli olan zamana eşit kesikli zaman damgasına sahip diğer tüm olaylar işlendikten ve sonuçlandıktan sonra, sisteme ait simülatör zamanı en yakın kesikli olarak programlanmış olan bir sonraki olaya ilerletir.

Çeşitli adi diferansiyel ve matematiksel denklemlerle tanımlanan sürekli simülasyon modeli ise, sistem içerisindeki bu denklemlerin simülasyona ait parametre ve değişkenlerce sayısal olarak çözülmesini ve sonuçlanmasını gerektirir. Genellikle sistem içerisinde bulunan ve yaygın olarak kullanılan sayısal bir algoritma sınıfı, sürekli olarak zaman çizgisini giderek yukarı yönde artan bir ayrık zaman anları kümesine ayırır ve bu peşi sıra gelen zaman anlarında sisteme ait olan durum değişkenlerinin sistemde kullanılacak olan sayısal değerlerini hesaplar. Sistem içerisinde hesaplanan bu ardışık iki zaman anı arasındaki sayısal aralığa integrasyon adımı denir ve örneklem içerisinde kullanılan sayısal algoritmaya göre bu zamansal adım sabit veya değişken olabilir (Bouchhima et al., 2007).

Statik ve dinamik simülasyon modelleri

Statik modeller, tasarlanan sistemin belirli bir andaki durumuna odaklanır ve sistem içerisinde birbirlerine karşı çeşitli belgelerle bağlanmış olan ilişkiler tarafından gerçekleştirilmesi sağlanan birden çok girdileri olan ve zamandan bağımsız olan simülasyon problemlerinin incelenmesi için uygundur. Statik bir model için bir örnek vermek gerekirse, herhangi bir yapının çeşitli yöntemlerle belirlenmiş olan belirli bir yüke ne kadarlık bir dayanma kabiliyetinin olduğunun incelenmesi olabilir. Öte yandan, dinamik modeller ise genellikle fiziksel olgulardan ziyade simülasyonun önemli unsurlarından birisi olan zamansal bir boyut içerir ve tasarlanmış olan probleme ait sistemin simülasyon akışı boyunca çalışmalarına ve zaman içindeki gelişimine odaklanır. Günümüzde sıkça rastladığımız ve sosyal hayat içerisinde sıkça gördüğümüz bir hava trafik kontrol modeli, dinamik bir simülasyon modelinin başlıca örneği olacaktır (Angeloudis & Bell, 2011).

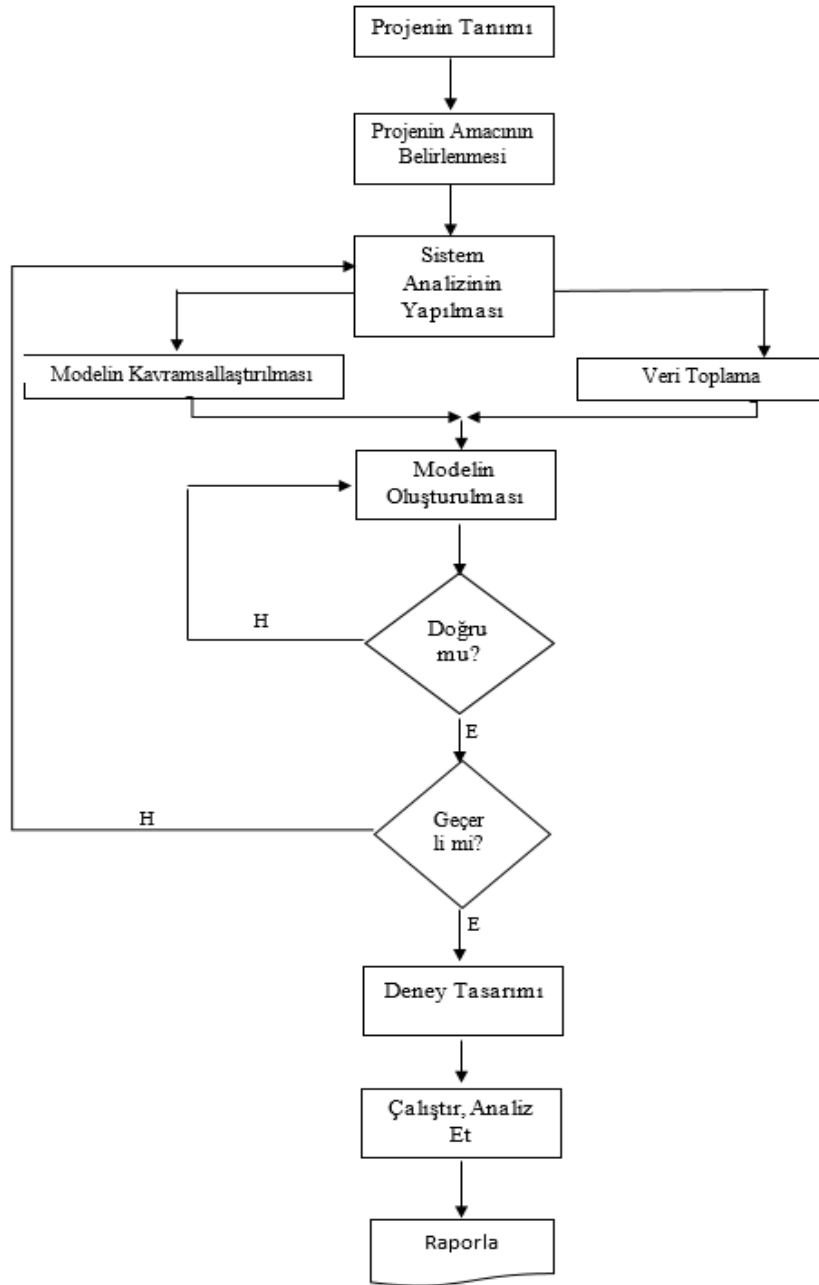
Stokastik ve deterministik simülasyon modelleri

Oluşturduğu modeli içerisinde rastgele değişken içermeyen simülasyon modelleri literatürde deterministik simülasyon modelleri olarak sınıflandırılır. Deterministik modeller, içerisinde barındırdığı model elemanları yardımı ile benzersiz bir dizi çıktı olarak sonuçlanacak

bilinen geniş kapsamlı bir girdi grubuna sahiptir. Bunun yanı sıra stokastik bir simülasyon modeli ise, model içerisinde kullanacağı simülasyon girdisi olarak bir veya daha fazla rastgele değişkene sahiptir. Sistem içerisinde simülasyonun doğru bir şekilde çalışmasını sağlayan bu rastgele girdiler, modelin çalışması sonucu benzer özellikler taşıyan rastgele çıktılara yol açar. Elde edilen bu çıktılar rastgele olduğundan dolayı, yalnızca simüle edilecek olan bir modelin gerçek özelliklerinin bilgisayar ortamında çalıştırılarak elde edilmiş olan tahminleri olarak kabul edilebilirler. Bilgisayar ortamında simüle edilmiş stokastik bir simülasyon modelinde, elde edilen çıktı ölçüleri modele ait sistemin gerçek özelliklerinin çalışma sonucu elde edilmiş olan istatistiksel tahminleri olarak ele alınmalıdır (Gibb et al., 2002).

Simülasyonun Aşamaları

Tasarımı yapılacak olan kapsamlı ve doğru bir şekilde çalışan bir simülasyon modelinin oluşturulması için izlenmesi gereken birkaç adım ve yapılması gereken bazı süreçler vardır. Bu simülasyon süreçlerini özetlemek için Şekil 1’de gerekli olan bilgiler sunulmuştur (Banks et al., 2005).



Şekil 1. Simülasyon çalışmasının aşamaları(Banks et al., 2005)

Problem tanımı

Tasarımı yapılacak olan her simülasyon çalışması problemin girişini belirten bir ifade ile başlamalıdır. Modeli simüle etmek isteyen politika yapıcılar veya sorunu yaşayanlar tarafından net ve açık bir şekilde sağlanırsa, modeli kuran analist açıklanan sorunun açıkça anlaşıldığından emin olabilir. Oluşturulması istenen simülasyon modeli için analist tarafından bir problemin bildirimi geliştiriliyorsa, modeldeki politika yapıcıların modele ait olan formülasyonları doğru bir şekilde anlaması ve kabul etmesi önemlidir. Tasarımlanan simülasyon çalışması ilerledikçe problemin yeniden formüle edilmesi ve tekrar en başa dönülmesi gereken durumlar vardır. Bu durumların bir çoğunda, modeli tasarlamak isteyen

politika yapıcılar ve analistler, karşılaştıkları problemin doğası gereği içeriğinin bilinmeden çok önce bir problemin olduğunun farkındadır.

Hedeflerin ve genel proje planının belirlenmesi

Tasarlanacak olan simülasyon modeline ait olan hedefler, modeli oluşturulacak olan simülasyon modeli tarafından cevaplanaması istenen soruların cevapları olarak karşımıza çıkmaktadır. Geline bu noktada, tasarımı yapılacak olan simülasyon modelinin problemin matematiksel olarak formüle edildiği şekliyle ve probleme ait hedeflerin belirtildiği şekliyle uygun bir metodolojiye sahip olup olmadığı konusunda genel çapta çalışılmış bir tespit yapılmalıdır. Eğerki tasarımı yapılacak olan simülasyon modelinin istenilen duyarlılığa uygun bir model olduğuna karar verilirse, uygulanması planlanan bir yöntemi içermelidir. Ayrıca, bir simülasyon modeli; çalışacak kişi sayısını, simüle edilen çalışmanın maliyetini, çalışma planlarını ve her bir aşamanın sonunda o aşama ile ilgili beklenen sonuçları içermelidir.

Modelin kavramsallaştırılması

Tasarımı yapılacak olan modelin kullanıcısının simülasyon modelinin kavramsallaştırması konusu içerisine dahil edilmesi tavsiye edilir. Tasarımı yapılacak olan modelin kullanıcısını model içerisine dahil etmek hem ortaya çıkan olan simülasyon modelinin başarısının bir göstergesi olan kalitesini artıracak hem de tasarlanan simülasyon modeli kullanıcısının modelin diğer dış çevresinde uygulanmasına olan güvenini artıracaktır.

Tasarımı planlanan gerçek bir sistem modelinin inşası muhtemelen bir bilim tekniği olmasının yanında ayrıca sihirli ellerle ve üstün düşüncelerle yapılmış olan bir sanat eserisidir. Simülasyon modeli içerisinde her aşamada başarılı olması beklenen ve istenilen hedeflere uygun modeller oluşturmaya izin verecek bir dizi talimatları vermek pek mümkün olmasa da, bu simülasyon süreci boyunca takip edilebilecek bazı genel modelleme kuralları vardır.

Veri toplama ve analizi

Oluşturulacak olan simülasyon modelinin tasarımı ile bu tasarım sırasında kullanılacak olan gerekli girdi verilerinin toplanması ve elde edilme süreçleri arasında doğru yönde çalışan sürekli bir etkileşim vardır. Tasarımı yapılacak olan simülasyon modelinin sistemsel olarak var olan karmaşıklığı değiştikçe, sistemde ihtiyaç duyulan gerekli veri öğeleri de değişebilir. Ayrıca, simülasyon modeli için gereken verileri toplama, oluşturulması planlanan bir simülasyonu gerçekleştirmek ve doğru bir şekilde çalıştırabilmek için gereken toplam sürenin neredeyse bu kadar büyük bir bölümünü kapsadığından dolayı, mümkün olduğunca erken, hatta

genellikle simülasyon modelini daha yeni oluşturmaya başlanıldığı ilk aşamalarıyla birlikte veri toplama işine başlamak gerekir.

Kurulacak olan simülasyon modelindeki çalışmanın amaçları, genel hatları ile, simülasyonda kullanılacak olan verinin verilerin türünü de belirler. Örneğin, bir bankanın gün içerisindeki çalışmasında, müşteri talebine yönelik olarak bankada çalışan veznedar sayısı değiştikçe bekleme hatlarının uzunluğunda veri setine bağlı olarak değişecektir.

Modelin oluşturulması

Bir çoğu gerçek hayat içerisinde bulunan ve bizim yaşamımız boyunca karşılaştığı dünya sistemleri, gerektirdiği veriler ve çalışma koşullarından dolayı çok fazla bilgi depolama ve sayısal hesaplama gerektiren simülasyon modelleri ile sonuçlanır. Bu nedenle oluşturulacak olan simülasyon modeli uygulamasının yapılacağı bilgisayar tarafından tanınabilir ve doğru bir şekilde çalışabilir bir formata girilmelidir. Simülasyon modelleyicisi olan kullanıcı, modeli piyasada bulunan ve bir çok kullanıcı tarafından çalışmalarında yardımcı olan bir simülasyon dilinde mi programlayacağına veya simüle edeceği modelinin çalıştırılmasında piyasada bulunan özel amaçlı simülasyon yazılımlarından birini kullanıp kullanmayacağına karar vermelidir. İmalat ve malzeme işleme modellerinin simülasyonlarını gerçekleştirmek için piyasada bulunan Arena®, AutoMod™, Extend™, Flexsim, MicroSaint, ProModel®, Quest®, SIMUL8® ve WITNESS™ gibi bilindik birçok simülasyon programı mevcuttur. Genelde piyasada bulunan simülasyon dilleri istenilen ölçülerde güçlü ve esnektir.

Modelin doğruluğu

Modelin doğrulaması, tasarımı yapılacak olan simülasyon modelinin içerisinde hazırlandığı ve modellendiği bilgisayar programının çalışma alt yapısı ile ilgilidir. Tasarımın yapıldığı bilgisayar programı modeli çalıştırabilecek şekilde düzgün ve doğru çalışıyor mu? Simülasyonu modellenecek olan karmaşık modellerde, modelin çalışması sırasında bilgisayar tarafından çok fazla hata ayıklama işlemi yapmadan çalıştırılacak olan karmaşık bir modeli bütünüyle başarılı ve eksiksiz bir şekilde çalıştırmak ve sonuç almak imkansız değilse de zordur; simüle edilecek olan karmaşık modelin istenilen giriş parametreleri ve bu parametrelerin birbirleri ile olan etkileşimini kontrol eden mantıksal yapısı bilgisayar içerisinde doğru ve hatasız bir şekilde temsil ediliyorsa model için gerekli olan doğrulama işlemi başarıyla tamamlanmıştır.

Modelin geçerliliği

Modelin doğru bir şekilde çalışması için istenen doğrulama genellikle modelin programlandığı bilgisayarın ve kullanılan programın doğru bir şekilde kalibrasyonu yoluyla elde edilir. Bunu yaparken simülasyon modelinin gerçek sistem davranışıyla karşılaştırılması işlemiyle beraber, tekrarlı bir simülasyon süreci ve modeli geliştirmek için bu iki model arasındaki tutarsızlıklar ve sonuçların ışığında kazanılan kişisel görüşler kullanılır. Simülasyonun ne kadarlık bir geçerliliğe sahip olduğunu gösteren bu süreç, modelin her aşamasında simülasyon modelinin doğruluğunun kabul edilebilir olduğuna kesin olarak karar verilene kadar sürekli bir şekilde tekrarlanır.

Deney tasarımı

Deneysel tasarımı yapılmak istenen model için simüle edilecek alternatifler ve çeşitli girdi değişkenleri belirlenmelidir. Genellikle, deneysel model içerisindeki kullanılan alternatiflerden hangilerinin simüle edileceğine ilişkin simülasyon kararları, simülasyonun şekillenmesi ve sonuca ulaşılması ile tamamlanan ve analiz edilen simülasyon çalışmalarının matematiksel bir fonksiyonu olacaktır. Çalışmalar esnasında simüle edilen her gerçek hayat sistemi tasarımı için, modelin çalışmasını etkileyecek olan başlatma periyodu uzunluğu, deneysel tasarımı yapılan simülasyona ait program çalışmalarının uzunluğu ve bu model için her çalıştırmada yapılacak simülasyon tekrar sayısı ile ilgili çeşitli kararların verilmesi gerekir.

Çalıştırma ve analiz

Simülasyona ait planlanan üretim çalışmaları ve uygulamanın çalışmasından sonra elde edilecek olan sayısal çıktı analizleri, simüle edilen örneğe ait sistemin doğru bir şekilde tasarlanması için simülasyona ait performans ölçümlerini tahmin etmek de kullanılır. Simüle edilecek olan modelin çalıştırılması ve sonuçlarında elde edilmesiyle birlikte tamamlanan çalışmaların çıktı analizi göz önüne alındığında, modeli simüle edecek olan analist tarafından analizle ilgili ek simülasyon çalıştırmalarının gerekli olup olmadığını ve analist tarafından eğer gerekli görüldüyse bu ek deneylerin hangi tasarım ve adımları izlemesi gerektiğini belirler.

Dökümantasyon ve raporlama

Çalışmalarda kullanılan İki tip dokümantasyon süreci vardır: bunlar içerisinde olayın genel yapısının oluşturulduğu program ve olayın akışının belirtildiği ilerleme sürecidir.

Bunlardan ilki olan program dokümantasyonu işlemi simülasyon modeli içerisindeki birçok nedenden dolayı uygulama aşamasında istem dışı bir zorunluluktur. İçerisinde modelin simüle edileceği program aynı veya farklı analistler tarafından başka bir model için tekrar

kullanılacaksa, genel simülasyon kuralları dahilinde kullanılacak olan programın nasıl çalıştığını ve nasıl yönlendirildiğini anlamak gerekebilir. Böylece, programı kullanacak olan analist için kullanılacak olan program güven yaratacak, sonucunda program kullanan model kullanıcıları ve çeşitli simülasyonlar için politika yapıcılar modelden elde ettikleri tecrübeler sayesinde analize dayalı kararlar verebilecektir.

Bunlara ek olarak, modelin tasarımında kullanılacak olan program aynı veya farklı bir analist tarafından kısmi yada temelli bir biçimde değiştirilecekse, bu adım eski modele bakılarak ve elde edilen veriler ışığında yeterli belgelerle büyük ölçüde kolaylaştırılabilir. Fakat henüz yeterince doğruluğu belgelenmiş olan bir simülasyon programı ile ilgili tecrübe edilmiş eski bir deneyim, genellikle o programı kullanacak olan bir analisti bu önemli adımın gerekliliğine ikna etmede oldukça güçlü ve yeterlidir.

Simülasyon tasarımı için kullanılacak olan bir programı belgelemenin bir başka nedeni de, simüle edilecek olan modeller için o modellere ait kullanıcıların modelin girdi parametreleri ile simülasyon sonucunda elde edilen çıktı performans ölçüleri arasındaki ilişkileri doğru bir şekilde öğrenmesi veya bazı simülasyona ait çıktı performans ölçülerini "optimize eden" modeldeki girdi parametrelerini özellikleri bakımında keşfetmek amacıyla modelde kullanılacak olan parametreleri istedikleri zaman istedikleri ölçüde değiştirebilmeleridir.

Uygulama

Simülasyon modeline ait tasarlanan uygulamanın başarısı, modelin kurulma aşamasında anlatılan yukarıdaki diğer on adet adımın ne kadar iyi gerçekleştirildiğine ve ne kadar iyi anlaşıldığına bağlıdır. Ayrıca, modeli analiz edecek olan analistin başından sonuna kadar tüm simülasyon süreci boyunca planlanan eldeki örnek model kullanıcılarını ne kadar kapsamlı ve doğru tekniklerle modele dahil ettiğine de bağlıdır. Simüle edilecek olan modelin kullanıcısı, tasarlanacak olan modelin oluşturma sürecine eğer tüm süreçleri ve aşamaları gözetiminde dahil olmuşsa ve simüle edilecek olan modelin kullanıcısı modelin sistemsel yapısını ve çalışması sonucunda elde edilecek olan çıktıları iyi bir şekilde anlıyorsa, bu uygulamanın güçlü bir uygulama olma olasılığı artar. Bunun tam aksine, simüle edilecek olan sisteme ait model ve modelin kapsamlı yapıları altında yatan çeşitli model varsayımları analist tarafından düzgün bir şekilde model içerisine iletilmezse, tasarlanmış olan simülasyon modelinin geçerliliğinden bağımsız olarak çalışma gerekliliklerinden dolayı tasarımı yapılan simülasyon modelinin uygulaması muhtemelen zarar görecektir ve model başarısız olacaktır.

Sistem Dinamiği

Sistem dinamiği, temel olarak gerçek hayat içerisinde karşılaştığımız karmaşık sistemleri açıklamaya ve bu karmaşık sistemlerin çalışma koşullarına göre zaman zaman dış çevresine nasıl davrandığını anlamaya yönelik çok kullanışlı ve bilindik bir yaklaşım olarak tanımlanır. Genel bir bakış açısı ile düşünüldüğünde bütün bir sistem olarak, sistem dinamiği modelleri, içerisinde barındırdığı kapalı döngülerin ve stokların veya dışarıdan istenildiği zaman müdahale edilebilen dinamik değişkenlerin davranışına dayanmaktadır.

Sistem dinamiği içerisinde bulunan ve çözülmesi istenen sisteme ait Stoklar, dinamik değişkenler ve bütün bu sistem elemanları arasındaki etkileşimi sağlayan bağlantılar özellikle tüm sistemin ve sistem içerisindeki elemanların birbiriyle nasıl ilişkili olduğunu ve sistemdeki bir değişkenin değişiminin yine aynı sistem içerisindeki bir başka değişkeni nasıl ve ne derecede etkilediğinin anlaşılmasını sağlamaktadır (Konyalıoğlu & Bereketli Zafeirakopoulos, 2018).

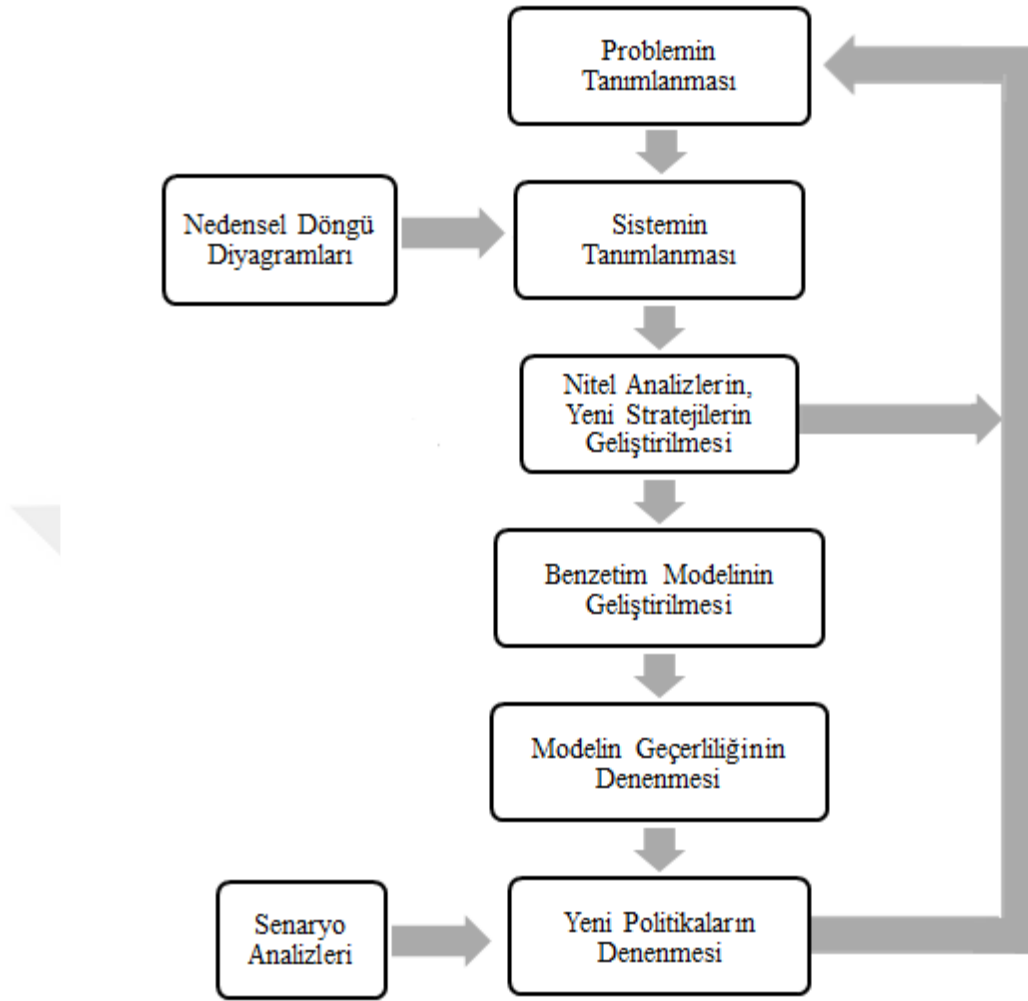
Öncelikle herhangi bir olay üzerinde çalışma yapılan ve sistem dinamiği modellemesini uygulamak için tasarlanan şeyin bütününe bakıldığında herhangi bir sistemin kendisini veya bir parçasını oluşturup oluşturmadığına karar verilmelidir. Çünkü tasarlanması planlanan sistem dinamiği modelleri çalışma metodolojisi bakımından bir sebep-sonuç ilişkisi mantığıyla çalışır. Tasarlanan bu sistemin tümünü doğru ve hızlı bir şekilde anlayarak, stoklara ait dinamik değişkenlerinin kontrolü sağlanabilir.

SD Modelleme Süreci

Sistem Dinamiği (SD) metodolojisinin oluşum süreci temel olarak tasarlanması planlanan problemin ortaya çıkmasıyla başlayan ve problemin çözümünde sisteme ait önerilen çeşitli yol ve yöntemlerin gerçek sisteme uygulanması ile sonlandırılan beş aşamadan oluşur.

İlk olarak, tasarlanacak sistemde modelleyici olan dinamik ve geri bildirim niteliklerine uygun olarak bir problem tanımı yapılmalıdır. İkinci adımda sistemin ilişkisel özelliklerini anlatan nedensel döngü diyagramları olarak da bilinen ve genel olarak etki diyagramlarının oluşturulmasıyla tasarlanacak olan sistem tanımlanır. nc aşamada, sistemin sözel verilerinin sayısallaştırılması ve var olan sayısal verilerinde model içerisinde kullanılması için nitel analizler gerçekleştirilir. Dördüncü aşama, modellenecek olan simülasyon modelinin bilgisayar ortamında modellenmek üzere geliştirilmesi ve çalıştırılarak doğrulamasının yapılmasını içerir. Son adım olan beşinci adımda ise, modellenecek olan simülasyon problemine ait sistem dinamikleri kullanılarak oluşturulan model test edilir ve elde edilen analiz

sonuçları yardımıyla simülasyon modeline ait politika tasarımı ve modelin son değerlendirmesi yapılır. Şekil 2’de SD modelleme aşamalarına ait çizelge verilmiştir (Şenaras, 2016).



Şekil 2. SD modelleme aşamaları (Şenaras, 2016)

Problem tanımlanması

Bir problemi simülasyon içerisinde modellemeye önce geniş bir şekilde en ince detayına kadar uygun bir yapıda tanımlamak SD modellemesinde ilk konudur. Tasarlanacak olan modelin fiziksel yapısı, tanımlanan problemin içerisinde barındırdığı şartlara ve bağlı olduğu parametrelere göre modellenmek istenen gerçek sistemin belirlenen kendine has yönlerinin bir gösterimi olarak oluşturulmalıdır. Simüle edilecek olan model ortak bir bilimsel yöntemle bilgisayar ortamında çalıştırıldığında hedeflenen modelin davranışını ve o modele ait çıktıları üretir. Sistem düşüncesinin doğası gereği, modellenecek olan bir SD modeli çalışmasının amaçlarından biri, oluşturulan modele ait sistemi belirli bir zaman diliminde modelin kendi dış dünyasından çalışma durumunu gözlemlemek olacaktır. Bu nedenle henüz işin başında problem tanımlama aşamasında modellenmesi planlanan problemin temel zaman birimi belirlenmelidir. Bu nedenle, modelin kuruluş aşamasındaki bu süreç içerisinde modele ait çözümde elde edilen

davranışsal bulgular, simülasyon çalışmasının kullanıcıya iyi yönde katkılar önerdiği şeklinde yorumlanabilir (Barlas, 2007).

Son olarak, modellenecek olan çalışmanın kapsamını geniş çapta kontrol etmek ve doğrulamak için öncelikli başlangıç değişkenlerinin belirlenmesi gereklidir. Ayrıca, modelde kullanılacak olan bu başlangıç değişkenlerinin zaman içindeki davranışları, bu değişkenlerle ilgili belirlenmiş olan tarihsel veriler kullanılarak elde edilmelidir. Eğer model içerisinde kullanılan bu başlangıç değişkenleri hakkında elimizde mevcut veri yoksa, tasarlanacak olan sistemi modelleyen modelleyici kendi görüşlerini kullanarak değişkenlerin zaman içindeki örüntüleri hakkında varsayımsal hipotez yürütmelidir (Gönül- Sezer & Ocak, 2020).

Sistemin tanımlanması ve etki diyagramlarının oluşturulması

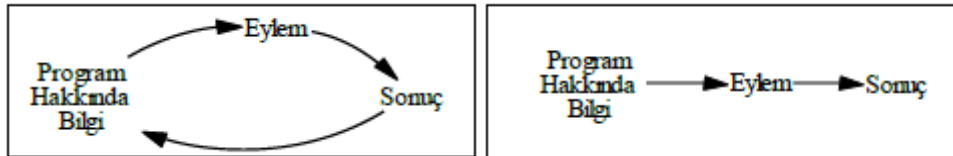
Modellenecek olan sistemin özelliklerine göre geniş çaplı bir literatür taraması yapmak, modeli kurulacak olan her türlü araştırma için olmazsa olmaz kilometre taşlarından biri olarak kabul edilir. Ayrıca, SD yaklaşımında, modeli oluşturulacak konu hakkında yapılan güçlü bir literatür taraması geçmişi, simüle edilecek olan problem hakkındaki bilgileri zenginleştirmek ve onu simülasyon çerçevesinde çok daha geniş bir şekilde değerlendirebilmek için çok önemlidir. Bu araştırılan konuya ait geçmiş bilgiler çeşitli yöntemlerle işlenerek sistemin dinamik davranışı üzerinde etkili olacak olan parametre ve değişkenler belirlenir. Modellenecek olan sisteme ait değişkenlerin tanımlanmasından sonra bu değişkenler arasındaki modelin ana hatlarını meydana getirecek olan nedensel ilişkiler belirlenir. Daha sonra, belirlenen model değişkenleri için aralarındaki bağlantıları oluşturmak üzere başlıca nedensel döngü veya etki diyagramları oluşturulur.

- Nedensel Döngü Şeması Yapısı: Model içerisinde kullanılan nedensel döngüler diyagramları (NDD), simüle edilen bir sistemin iç dinamiklerinin modele ait dış sistemle oluşturduğu etkileşimlere karşılık gelen bir zihinsel temsildir (Doyle & Ford, 1998).

Diğer bir ifadeyle, model içerisinde kullanılan nedensel döngü, tasarlanan sistem dinamiği modeli içerisinde bulunan çeşitli değişkenler arasındaki iyi yönlü veya kötü yönlü gelişecek olan ilişkileri çizmeye yarayan ve kullanıcılara değişkenler hakkında yorum yapabilmeyi sağlayan bir diyagram oluşturma yaklaşımıdır. Modellerin içerisinde sıkça kullanılan bu teknik, tasarlanacak olan karmaşık sistemin matematiksel denklemlerini türetmeden önce değişkenlerin kendi aralarında gerçekleşecek olan etkileşimli geri besleme döngüsü yapılarını göstermek için model kurucusuna bir fırsat sağlar. Nedensel döngü diyagramlarının SD modelleme yöntemi üzerindeki büyük etkisi göz ardı edilmemelidir.

Problemlere ait sistemleri tasarlayacak olan modelciler, NDD'leri kullanarak tasarlamak istedikleri modeli kolayca uyarlayabilir ve kavrayabilir. Nedensel döngü diyagramlarındaki sisteme ait değişkenler, birbirleri arasındaki bağlantıyı sağlayan ve oklarla gösterilen “nedensel bağlantılar” ile birbirlerine ilişkilidir. NDD'nin oluşumu sırasında, sistem içerisindeki her biri nedensel bağlantıya birbirine bağlı olan değişkenlerden birinin değerinde değişiklik olması durumunda bu değişkenle bağlantılı olan diğer sistem değişkeninde meydana gelecek olan değişimin nasıl olduğunu göstermek bu iki değişkeni birbirine bağlayan okun uç kısmına pozitif (+) veya negatif (-) bir polarite atanır. Sistem içerisinde kullanılan bu bağlantı polariteleri kullanıldığı sistemin fiziksel yapısını ve modelin ne yönde işlediğini tanımlar. SD modellemesine ait bir sistemde kullanılan iki tür geri bildirim yapısı vardır (Gönül- Sezer & Ocak, 2020).

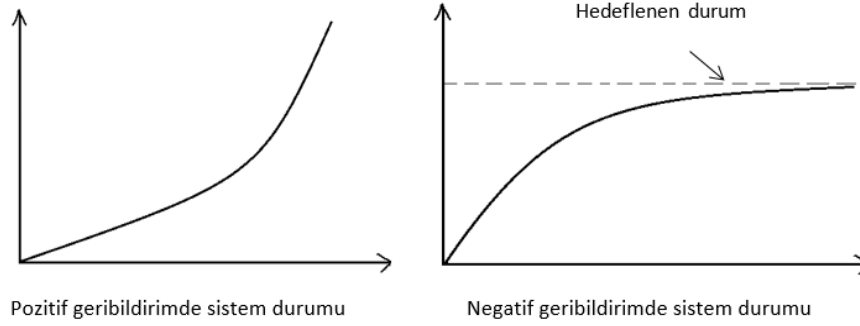
- Pozitif Geribildirim: “Kapalı” veya “Açık” döngüler, sistem iöerisinde karşımıza çıkan pozitif geribildirim yapıları için kullanılabilecek olan alternatif ifadelerdir. Sistem içerisindeki böyle bir yapıda, dışardan bir müdahale ile veya sistemin kendi başına yapmış olduğu değişikliklere bağlı olarak sistem içerisindeki tanımlanan bir değişkendeki artış, sistemin yapısı gereği sistemin sayısal olarak ilerlemesini artırmak istemesinden dolayı sürekli olarak kendini besler. Bir başka ifadeyle, sistem içerisinde bulunan bir pozitif geri besleme döngüsündeki değişkenler kendi aralarında karşılıklı bir etki yaratır ve bu etkinin sonucunda birbirlerini sonucu iyi yada kötü olacak şekilde aynı yönde uyarır (Morecroft, 2015).



Şekil 3. Kapalı ve açık döngü yapıları (Morecroft, 2015)

- Negatif Geribildirim: “Kendini düzenleyen” ve “uyarlanabilir” gibi terimler, SD içerisindeki geribildirim unsurlarından birisi olan negatif geri besleme sistemleri veya dengeleme döngüleri için sıklıkla kullanılır. Sistemler içerisinde bulunan negatif geri besleme sistemleri, sistem içerisindeki parametre ve değişkenlerin durumuna göre belirli bir sayısal değere, düğümler arasındaki herhangi bir noktaya veya değişkenlerin göstermiş oldukları herhangi bir davranışa odaklanır. Bu, simülasyon modellemede kullanılan bu tür sistemlerin çalışma metodolojileri kapsamında her zaman kesin hedefi aradığı ve kesin hedefe odaklandığı anlamına gelir. Modellenen simülasyon içerisindeki hedefe ulaşmak için harekete geçen

karmaşık sistem, bu hedefi yakalamaya yönelik çalışmaları ile sürekli olarak eldeki mevcut çıktısına, çalışma metodolojisine bağlı olarak genel konumuna veya model içerisindeki fiziksel durumuna ihtiyaç duyar. Sonuç olarak, negatif geribildirim tasarımı yapılan bir model içerisinde bulunduğu sürece model içerisindeki bir sisteme her zaman istikrar veya inatçılık getirir.



Şekil 4. Pozitif ve negatif geribildirim yapısı (Salkın, 2014)

Nitel analizler

Sistemin Bu aşamasında temel amaç, tasarlanmış olan modelin çalıştırılmadan önce başlangıç koşullarındaki davranışlarını gözlemlemek ve gerek görüldüğü takdirde modellemenin daha başındayken gerekli müdahaleleri yapmaktır. Bu olaya modellenecek olan sisteme ait başlangıç durumlarının tanımlanması denir. Modellenecek olan bir sistemin başlangıç durumları, sistem içerisinde bulunan girdilerin ve iç dinamiklerin birbirleri arasında mevcut olan koşullarına göre sistemin fiziksel temsili olarak tanımlanabilir. Sistemin modelleyicisi, modelleyeceği sisteme ait olan başlangıç koşullarına ve sisteme verilen girdilere başvurarak modellediği simülasyonun sonuçlarını yorumlar.

Benzetim modelinin oluşturulması

SD modelleme, simülasyon modelleri içerisinde bulunan hem dışsal hem de içsel değişkenler için geliştirmiş olduğu geri besleme mekanizmalarını ve bu değişkenler arasında kurulan ilişki diyagramlarını yürüten bir simülasyon yaklaşımıdır. Bu simülasyon modelleme tekniği, modelcilerin literatürde bulunan birçok karmaşık sistemin iç dinamiklerini daha kolay ve anlaşılır bir şekilde kavramasını sağlamaktadır (Maani & Cavana, 2000).

Bu aşamada artık modele ait olan NDD üzerindeki model değişkenleri stok ve akış değişkenleri olarak sınıflandırılır. Stokların kurulacak olan modeldeki çalışma mantığı sistem içerisinde zaman içinde birikim göstermesi şeklinde olmaktadır. Sisteme ait herhangi bir zaman aralığında sistemin sayısal birikimler üzerindeki durumunu temsil ederler. Sistemin taşıyıcı bantları konumundaki akışlar ise, stokları taşınacağı yöne doğru yönlendirir ve değerlerini

değiştirir. Ayrıca stokların zamana bağlı olarak değişim hızını gösterirler ve bu değişimin ne kadarlık bir miktarda olması gerektiğini düzenler.

Simülasyon modeli oluşturma sürecindeki dikkat edilecek diğer bir konu da model içerisinde kullanılacak olan parametreler ve stoklar için başlangıç koşullarının belirlenmesidir. Herkesin bildiği gibi her diferansiyel denklemin kullanım şartlarına uygun olarak elde edilmiş olan homojen ve özel bir çözümü vardır. Elde edilen bu özel çözüm, yalnızca sistem içerisinde sunulan başlangıç koşulu bilgisi ile elde edilebilir. Tasarlanacak olan modeldeki başlangıç koşulları, zaman içinde modelin çalışması ile birlikte mevcut sistemin davranışını doğrudan etkiler. Bundan dolayı, modele ait olan başlangıç koşullarının belirlenmesi modelin çalışma şartları için kritik öneme sahiptir.

Benzetim modeli oluşturma son kısmı tasarlanacak olan modelin doğrulamasının yapılmasıdır. Modelden elde edilecek olan çıktıların analiz edilmesinden önce, modelci tarafından odaklanılması gereken kısım modelin doğrulanmasının yapılmış olmasıdır. Yapılacak olan doğrulamada ele alınması gereken ilk konu, sistemin çalışmasını sağlayacak olan gereksinimler ile modele ait problem ifadesi arasında bir ilişki kurmaktır. Bu aşamadan sonra bir sonraki analiz ise, modele ait olan problem ifadesinin kendi bünyesinde barındırmış olduğu tüm sorulara karşılık gelmesi gereken elde edilmiş model çıktıları üzerinde yapılmalıdır. Elde edilen bu çıktıları kontrol ettikten sonra, kavramsal model tasarlanacak olan sisteme ait gereksinimlerin varlığına göre tekrardan gözden geçirilmelidir. Böylece, simülasyonu modelleyecek olan modelleyici simülasyon modelinin çalışma prensiplerine uygun ve doğru olduğundan emin olabilir (Richmond & Peterson, 2001).

Genel olarak, benzetim modeli oluşturma aşaması, model içerisinde kullanılacak olan stok akış diyagramlarının geliştirilmesi ile başlar ve bunu modelin çalışma metodolojisini tamamlayan matematiksel modelin türetilmesi takip eder. Sistemin tasarımcısı olan modelleyici, sistem içerisinde kullanılacak olan başlangıç koşullarının sayısal değerlerini kontrol etmeli ve belirlemelidir. Sisteme ait olan bu başlangıç koşulları belirlendikten sonra çalıştırılmak üzere simülasyon modelinin doğrulaması yapılmalıdır.

Politikaların test edilmesi ve tasarımı

Simülasyonu modeli kurulacak olan bir SD modelinin doğrulanması yapmak oldukça karmaşıktır çünkü tasarlanacak olan model yapısının geçerliliğini önceden tahmin etmek felsefi ve teknik detayları bakımından zordur. Bu nedenle literatüre bakıldığında, oluşturulacak olan model için yapısal geçerliliğin ve davranışsal geçerliliğin sağlanması önerilmektedir. SD modellerine ait model geçerlilik prosedürü literatürde kullanılan diğer simülasyon

tekniklerinden yapılan analiz ve doğrulamalar bakımından daha farklıdır. Ayrıca literatürde, simülasyon için kullanılan bu tür sistemlerin geçerliliği konusunda çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Barlas, 1996).

Oluşturulacak olan simülasyon modelinin yapısal güvenilirliğinin kontrol edilmesi, SD yaklaşımında tasarlanan modeller için yapılan doğrulamanın ilk kısmıdır. Bir başka ifadeyle, simüle edilmesi planlanan gerçek sistemin genel yapısı ve parametreleri simülasyon modeline doğru bir şekilde aktarılmalıdır. Buna ek olarak, model içerisinde kullanılan çeşitli sistem elemanlarına ait boyutsal tutarlılık için model parametre birimleri, modele ait stoklar ve akışlar gözden geçirilmelidir. Sistem modelleyicisi, geliştirilen modelin mantıksal ve fiziksel yapısının geçerliliğini sağlayabilirse modelin gelişimi için bir sonraki aşama olan modele ait davranışsal güvenilirliğin testine geçilir. Davranış geçerliliğinde simülasyondan elde edilen model çıktısından üretilen mantıksal değerlerin simüle edilen gerçek sistem kapsamında gerçekçi ve makul olması gerekmektedir.

Modele ait yapısal geçerliliğin sağlanması sırasında SD modeli bazı spesifik testlere tabi tutulur. İlk adım olarak, simüle edilen modelin modelleyicisi tarafından belirlenmiş olan kavramsal sınırı, sınır yeterlilik testi altında analiz edilir. Bu testte simüle edilecek olan modelin, ele alınan problemle ilgili kavramsal byuttaki tüm yönleri kapsayıp kapsamadığı kontrol edilir. Takip edilecek bir sonraki aşama ise, simüle edilecek olan SD modelinin yapısal olarak değerlendirmesidir. Bu testte modelci tarafından simüle edilecek olan kavramsal modelde yer alan her ilişki tüm yönleri ile kontrol edilmeli ve doğrulanmalıdır.

Modelde kullanılacak olan parametreler için gerçekleştirilen parametre değerlendirmesi de model nalizi için kullanılan bir diğer önemli yapısal geçerlilik testidir. Bu testte sistemin yöneticisi olan modelciler modelde yer alan tüm model parametrelerini betimsel ve sayısal olarak detaylıca inceler. Eğer parametreler makul bulunursa sıra boyutsal tutarlılığa gelmiş demektir. Bu aşamada simüle edilecek olan modeldeki denklemin sağ tarafındaki değişkenlere ait birimlerin, denklemin sol tarafındaki sayısal boyutlara eşit olması beklenir. Modelin test edilmesi noktasında kullanılan yapısal geçerlilik kapsamındaki son test, modeldeki aşırı uç noktaları kapsayan aşırı koşullar testidir. Bu testte, çalışılacak olan model denklemlerinin kendine özgü olan aşırı koşulları altında sistematik ve mantıksal olarak anlamlı olup olmadığını kontrol etmek için model içerisinde kullanılacak olan girdiler uç değerlerine göre belirlenir (Sterman, 2002).

Model içerisinde kullanılan davranışsal geçerlilik testinin amacı, model davranışının doğruluğunu sağlamaktır. Bu test, ancak modelcinin tasarlayacağı modeli tama anlamıyla bitirip model yapısına güvenden sonra gerçekleştirilir. Geliştirilen modelin davranışsal

geçerliliğini anlamak ve bu geçerlilik anlayışına uygunluğunu sağlamak için davranış yeniden üretim testi ve davranış anormallik testi adı altındaki testler uygulanmaktadır. Modelin çalıştırılması ile elde edilen model sonuçları, davranış yeniden üretim testi içerisinde gerçek sistem sonuçlarıyla karşılaştırılır. Davranış anormallik analizi için temel amaç, tasarlanan model içerisindeki belirli bir ilişki ihmal edildiğinde veya değiştirildiğinde modelin bu değişiklik karşısında anormal davranış oluşturup oluşturmadığını görmektir.

Simüle edilen model içerisinde barındırdığı parametrelere ait değişimlerden etkilenmediği takdirde modele ait tutarlılık ve güven artacaktır. Böylece duyarlılık analizinde modelde kullanılacak olan çeşitli parametreler küçük değişikliklere ($\pm\%10$) tabi tutulur ve bu küçük değişiklikler için modelden elde edilen sonuçlar incelenir. Eğer modelci tarafından dışarıdan gerçekleştirilen bu değişiklikler model içerisindeki bir parametrede çarpıcı sonuçlar üretiyorsa, parametre değerini tahmin etmek için daha fazla çabaya ihtiyaç vardır. Simülasyon modellerinde duyarlılık analizi bu aşamanın en kritik ve dikkat edilmesi gereken kısmıdır. Amaç, tasarlanacak olan modelde kullanılan parametreler üzerindeki hassasiyeti en aza indiren bir model tasarlamaktır. Özellikle sosyal sistemlerde genellikle duyarlılık anlamında güçlü ve dışardan yapılan müdahalelerle değiştirilmesi zor sistemler tasarlamak mümkün değildir. Bu nedenle, kurulacak olan simülasyon modellerinde duyarlılık analizi, bu gibi durumlarda nasıl hareket edilmesi gerektiğine dair modelciye tavsiyeler verir (Serman, 2002).

SD modeli için oluşturulan politikaların test edilmesinden sonra sıra bu politikalara ait tasarım iyileştirme aşamasına gelir. Modelde yapılan testlerden elde edilen veriler ve çıkarımlar ışığında tasarım iyileştirme aşaması, senaryo planlaması ile başlar. Senaryo planlaması, simülasyon modellerini tasarlayacak olan yöneticilere modelin tüm aşamalarındaki işlerini etkileyen güçleri belirlemeleri için bir çerçeve sağlar. Modelcilerin kullanımı için modele ait olasılıklar yelpazesini yakalar ve modelcinin sisteme ait gelecekteki eylemlerini ve kararlarını gerçekleştirmesine katkıda bulunur. Karar vericilerin tasarladıkları simülasyon sisteminin geleceği için sistem hakkındaki kendi his ve düşüncelerini geliştirmelerine yardımcı olurlar. Senaryo planlamasında tasarlanacak olan simülasyon modeli, planlanan bu politika ve stratejileri kullanılarak çeşitli koşullara tabi tutulur. Simülasyon modelleri için Politika terimi tek bir model değişkenini değiştirmek anlamına gelirken, Strateji ise daha geniş kapsamlı olarak bir dizi politika kombinasyonu ve değişikliklerini kontrol etmek anlamına gelmektedir.

(Schoemaker, 1995), model için oluşturulacak olan senaryoların ya iyimser ya da kötümser sonuçları ve ya gelecekteki model ortamının potansiyel iletişimini temsil edecek şekilde seçilmesi gerektiğini öne sürmüştür. Ona göre, modelci tarafından verilecek olan kararlara etki edebilecek model içi belirsizlikleri ve faktörlerle birlikte değişimin temel itici

güçleri birlikte değerlendirilmelidir. Daha sonra çalıştırılacak olan simülasyon modelinin iç tutarlılığını kontrol etmek için modelin kendine özgü özelliklerine göre iyimser ve kötümser senaryolar oluşturulmalıdır. Son olarak, modele verilmek üzere oluşturulan bu senaryolar, nihai hedef senaryolarını tasarlamak için değiştirilmelidir.

Bu çalışma kapsamında buraya kadar simülasyon ve SD model yaklaşımına dair süreç ve metodolojilerden bahsedilmiştir. Bundan sonraki konu başlığı içerisinde, çalışma kapsamında uygulama konusu gereği literatürden elde edilen çeşitli bilgilerden bahsedilecektir. Çalışmanın konusu olan COVID-19 salgınına dair hastalığın yayılmasında etkili rol oynayan temel üreme katsayısı R_0 , salgın sırasında görülen çeşitli COVID-19 salgın varyantları ve salgının seyri sırasında ortaya çıkan çeşitli toplumsal salgın oranları gibi birçok salgın verisini kullanarak bu gibi bulaşıcı hastalıkların modellenmesinde kullanılan SIR model yapısından bahsedilecektir.

SIR Salgın Modelleri

SIR modelleri tasarlanan simülasyon sistemleri içerisinde kullanılırken içerdikleri mantıksal çerçeveden dolayı zamana göre değişebilecekleri için tür olarak dinamik sistemler sınıfına girmektedir. Model içerisinde kullandıkları popülasyonu Duyarlı, Etkilenmiş ve İyileşmiş olmak üzere üç sınıfa ayıran matematiksel epidemiyolojide bölümlü simülasyon modellerinin yapı taşlarıdır. Genel olarak, bu dinamik ve karmaşık modeller hastalıksız ve endemik denge olmak üzere iki tür dengeyi kabul eder. Eğer hastalıksız denge sistem içerisinde küresel olarak kararlıysa, zamanla sistem içerisindeki hastalık ölür. Fakat endemik denge sistem içerisinde küresel olarak kararlıysa, zamanla sistem içerisindeki hastalık popülasyonda denge düzeyinde devam eder.

Salgın hastalıkların yayılımı üzerine yapılmış epidemiyolojik gelişmelerdeki öncü çalışma Kernack ve McKendrick tarafından yapılmıştır. Diğer salgın modellerinden farklı olarak salgın modellerini oluşturmak için SIR modeli, S, I ve R olarak adlandırılan üç esas bölmeden oluşur. Bunlardan $S(t)$ ve $I(t)$ sırasıyla sistem içerisindeki duyarlı ve enfekte olmuş olan kişileri temsil eder. Bu iki parametreye ek olarak, $R(t)$ bulaşıcı hastalığa yakalanarak enfekte olmuş ve daha sonra yakalandığı bu hastalıktan kurtulmuş veya hastalığı geçirdiği için hastalığa karşı bağışık, ölü veya başka türlü olan simsemdeki diğer bireylerin sayısını temsil eder (Beckley et al., 2013).

$S(t)$, $I(t)$ ve $R(t)$ 'nin kullanılan bu sistem içerisindeki dinamikleri aşağıdaki sayısal formüller aracılığı ile gösterilmektedir:

t zaman dilimi içerisinde;

- ❖ $S(t)$: Popülasyondaki hastalığa duyarlı birey sayısı
- ❖ $I(t)$: Popülasyondaki hastalıktan etkilenen birey sayısı
- ❖ $R(t)$: Popülasyondaki hastalığa bağışıklık kazanan birey sayısı
- ❖ $N(t)$: Toplam popülasyon sayısı
- ❖ β : Enfeksiyonu bulaştırma oranı
- ❖ γ : Enfekte olup da sonradan bağışıklık kazanma oranı
- ❖ $N=S+I+R$

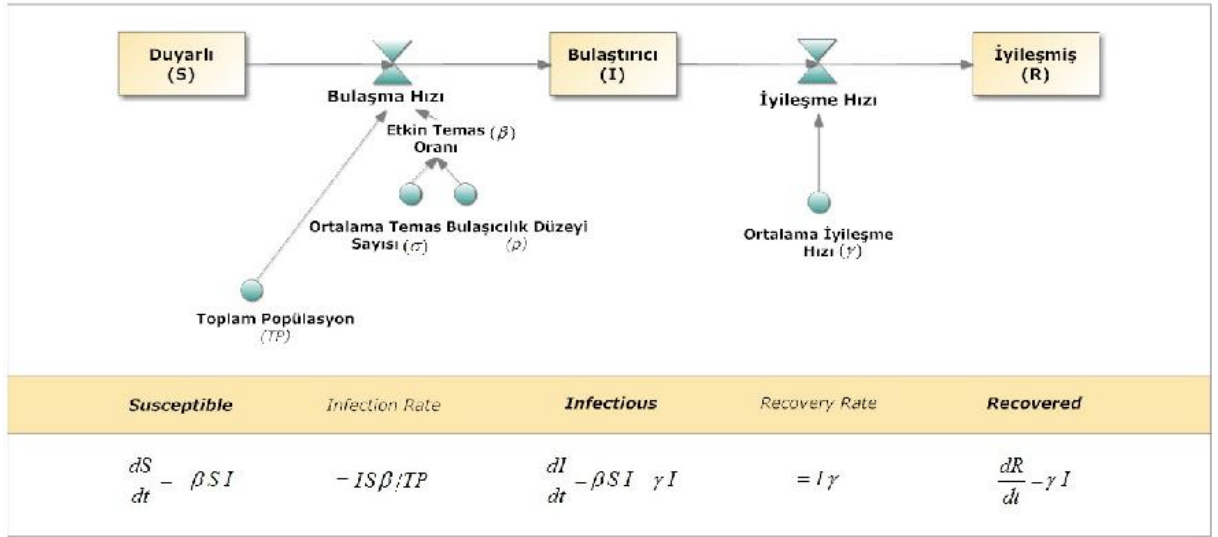
olarak tanımlanır.

$$N=S(t)+I(t)+R(t) \quad (1)$$

$$S'=-\beta S(t)I(t) \quad (2)$$

$$I'=\beta S(t)I(t)-\gamma I(t)=(\beta S(t)-\gamma)I(t) \quad (3)$$

$$R'=\gamma I(t) \quad (4)$$



Şekil 5. SIR model yapısı (Akpınar, 2012)

SIRS Salgın Modelleri

Salgın hastalıklar için kullanılan bir başka model olan bu modelde, toplam popülasyon N , bir önceki konuda anlatılan SIR modelinde olduğu gibi yine üç bölüme ayrılmıştır. Hastalığa karşı duyarlı kişiler S ile, salgın hastalık tarafından enfekte olan kişiler I ile ve hastalık geçirdikten sonra iyileşen kişiler ise R ile gösterilir. SIR modelinde olduğu gibi, sistem içerisindeki enfeksiyona maruz kalmış bireyler tarafından enfekte edilen hastalığa duyarlı olan bireyler, enfekte olduktan ve hastalık süreci geçtikten sonra bağışıklık kazanır ve iyileşir. Ancak sistem içerisindeki bazı salgın hastalıktan dolayı enfekte olmuş olan kişilerde sonradan

kazanılmış olan bu bağışıklık bir süre sonra kaybolabilir. Diğer bir ifadeyle, iyileşmiş kişilerin oluşturduğu bireyler bölümü hastalığa karşı geliştirdikleri bağışıklık tarafından korunamayacak ve sistemdeki hastalığa karşı duyarlı olan bireylerin bulunduğu bölüme yeniden katılacak(Şengül & Yıldız, 2021).

$S(t)$, $I(t)$ ve $R(t)$ 'nin kullanılan bu sistem içerisindeki dinamikleri aşağıdaki sayısal formüller aracılığı ile gösterilmektedir:

t zaman dilimi içerisinde;

- ❖ $S(t)$: Popülasyondaki hastalığa duyarlı birey sayısı
- ❖ $I(t)$: Popülasyondaki hastalıktan etkilenen birey sayısı
- ❖ $R(t)$: Popülasyondaki hastalığa bağışıklık kazanan birey sayısı
- ❖ $N(t)$: Toplam popülasyon sayısı
- ❖ β : Enfeksiyonu bulaştırma oranı
- ❖ γ : Enfekte olup da sonradan bağışıklık kazanma oranı
- ❖ $N=S+I+R$

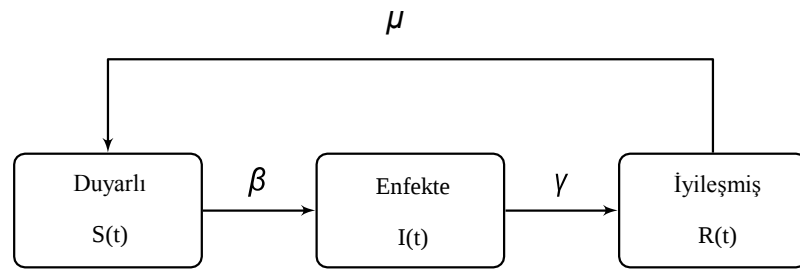
olarak tanımlanır.

$$N(t) = S(t)+I(t)+R(t) \quad (5)$$

$$S' = -\beta SI + \mu R \quad (6)$$

$$I' = \beta SI - \gamma I \quad (7)$$

$$R' = \gamma I - \mu R \quad (8)$$



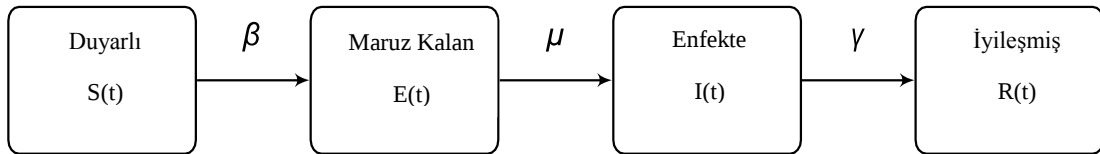
Şekil 6. SIRS model yapısı(Şengül & Yıldız, 2021)

SEIR Salgın Modelleri

Önceki anlatılan salgın modellerinden farklı olarak, bu kısımda bahsedilen salgın modeli, $E(t)$ ile temsil edilen ve popülasyondaki kişilerin hastalığa açık olduğunu belirten bir başka sınıfın eklenmesi ile tamamlanmıştır. Başka bir ifadeyle, SEIR modeli dört bölümden oluşmaktadır:

- Duyarlı sınıf $S(t)$, sistem içerisinde bulunan salgın hastalığa ait olan virüsü kapabilen ve bu virüse maruz kaldığında toplumun diğer bireyleri için bulaşıcı kişi konumuna gelebilecek olan kişileri ifade eder.
- Maruz kalan sınıf $E(t)$, sistem içerisinde bulunan salgın hastalığa ait olan virüse maruz kalmış veya virüs tarafından enfekte olmuş ancak henüz toplumun diğer bireyleri için bulaşıcı olmayan kişilerin sayısını gösterir. Yani sistemin bu aşamasında salgın hastalık virüsü toplumdaki bazı insanlara bulaşmasına rağmen virüsün bulaştığı bu kişilerde henüz virüse ait belirtileri gözlemlenmiyor.
- Bulaşıcı sınıf $I(t)$, sistem içerisindeki popülasyonda bulunan duyarlı yani hastalık kapma potansiyeli bulunan bireylerle temas kurarak bu kişilere hastalığı bulaştırabilen enfekte durumdaki bireylerin sayısını ifade eder.
- İyileşmiş sınıf $R(t)$, sistem içerisindeki salgın hastalıktan herhangi bir şekilde bağımsızlık kazanmış olan kişileri ifade eder.

Bu salgın modelinin çalışma sürecini anlamak çok kolaydır. Ebola bulaşıcı hastalığına ait hastalık virüsünün bulaşma süreci bu modeli anlamamız için örnek olarak verilebilir [32, 36]. Hastalık yayan virüsün popülasyondaki kişilere bulaşmasından sonra, toplumdaki duyarlı bireyler bulaşıcı hale gelmeden önce maruz kalan kişilerin olduğu bölüme girerler ve sonra ya belirli bir zaman içerisinde iyileşirler ya da ölürlər. Ancak salgın modelleri içerisinde bulunan en basit SEIR modeli üzerinde çalıştığımız için çalışma kapsamında yeni doğumları ve ölümleri görmezden geliyoruz. Ayrıca, bu sistem içerisinde bulunan popülasyonun toplam boyutunun sabit olduğunu varsayıyor ve sabit olan bu değerin varsayımını $N(t) = S(t) + E(t) + I(t) + R(t)$ formülasyonu ile gösterebiliriz.



Şekil 7. SEIR model yapısı(Şengül & Yıldız, 2021)

SEIR salgın modelile ait sistemin dinamikleri aşağıdaki denklemlerle tanımlanır:

$$N(t) = S(t) + E(t) + I(t) + R(t) \quad (9)$$

$$S' = -\beta SI \quad (10)$$

$$E' = \beta SI - \mu E \quad (11)$$

$$I' = \mu E - \gamma I \quad (12)$$

$$R' = \gamma I \quad (13)$$

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, epidemik parametrelere, aşı lojistiğine, SARS-CoV-2 varyantlarına ve yayılma oranına dayalı COVID-19 pandemik değerlendirmesi için sistem dinamiği temelli bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Bu simülasyon modeli Türkiye ve Dünya üzerindeki bazı salgın verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışma uygulamanın yapılacağı Türkiye Cumhuriyeti Devletine ait popülasyonun salgın hastalık karşısında modelde kullanılan çeşitli parametreler doğrultusunda elde edeceği toplumsal bağışıklığı belirlemek ve bu değerin hangi faktörler tarafından etkilendiğini simüle etmek amacı ile AnyLogic 8.7.2 programında modellenmiş olan üç farklı aşı tedarik senaryosu üzerine yapılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre tasarlanan model yorumlanmış çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

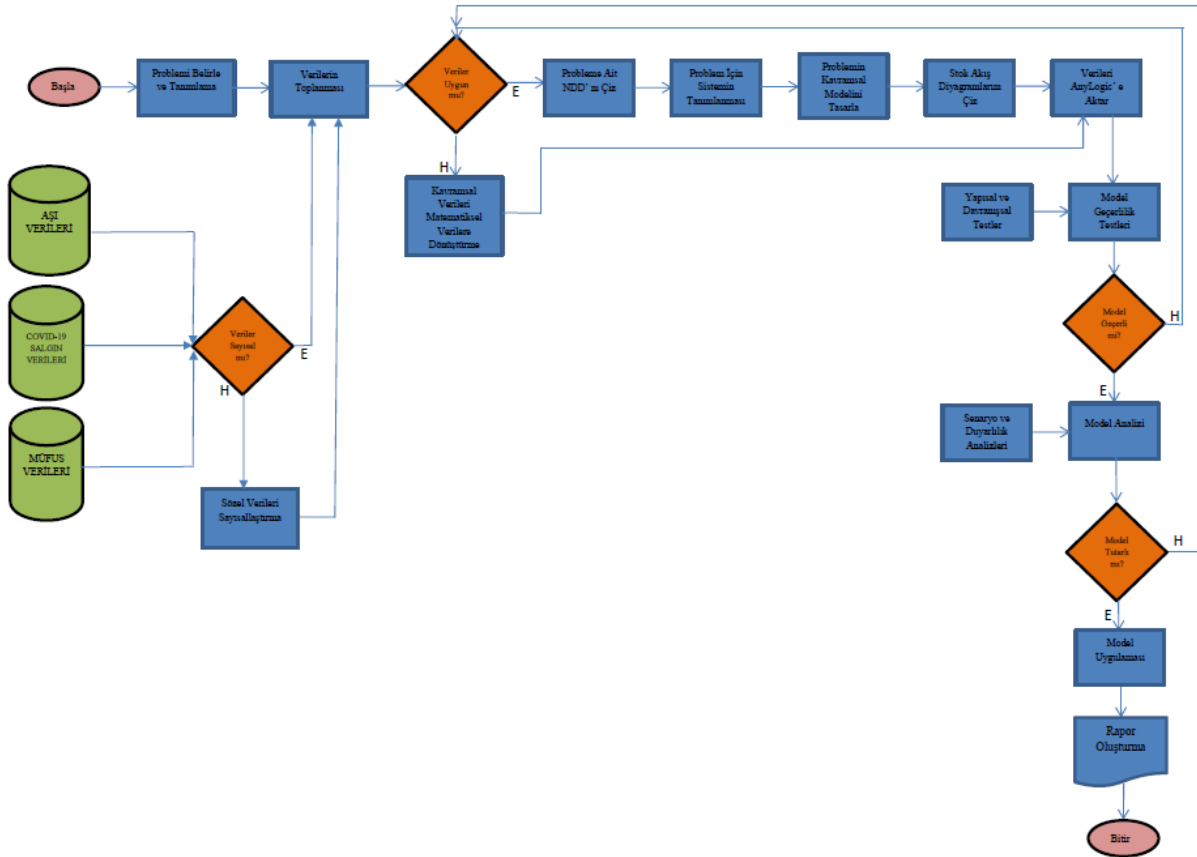
Simülasyon Modelinin Oluşturulması

Bu çalışmada COVID-19 salgınına dair toplumsal karantina politikaları, kişisel insan iletişimleri, hastalığın yayılmasında etkili rol oynayan temel üreme katsayısı olan R_0 , salgın sırasında görülen çeşitli COVID-19 salgın varyantları ve salgının seyri sırasında ortaya çıkan çeşitli toplumsal salgın oranları gibi birçok salgın verisini SD çerçevesinde modellemekteyiz. Bunlara ek olarak çalışmanın asıl odak noktası olan COVID-19 hastalığında toplumu derinden ilgilendiren ve salgının yayılmasından tutunda salgına dair tüm olumsuz değerleri azaltacak olan aşı lojistiği ile aşının topluma uygulanması ile birlikte toplumsal bağışıklığa etkisini yine bu SD model çerçevesini kullanarak modellemekteyiz.

SD çerçevesi içerisinde kullanılacağımız bu faktörler arasında nasıl bir ilişki olduğu nedensel döngü diyagramları (NDD) halinde düzenleyip, daha sonra ilgili stok ve akış diyagramları oluşturularak modelin simülasyonuna geçilmiştir. SD modelinden elde ettiğimiz sayısal veriler ve bir takım değerlerin tahmin edici değerler olmadığına dikkat ederek, SD modelinin sistem içerisinde var olan nedensel döngülerden etkilenen model değişkenlerinin zamana bağlı olarak değişimini ve nasıl davrandığını göstermek için kullanıldığını bilmeliyiz.

Bu çalışmada geliştirilen SD modeli, (Araz, 2013) tarafından tasarlanan SIR (Duyarlı-Enfekte-İyileştirilmiş) temelli simülasyon modeli göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Bu SD modelinin uygulama kısmında kullanılan çeşitli parametre ve değişkenlerde literatüre dayalı veriler ile bazı çalışmalardan yararlanılarak belirlenen verilere yer verilmiştir.

Şekil 8’de, problemin tasarım ve çözümündeki verilerin nasıl kullanılabilir hale getirildiğini anlamamızı sağlayan, modelin tüm süreç ve aşamalarını entegre bir şekilde anlatan SD modelimize ait akış diyagramı sunulmuştur.

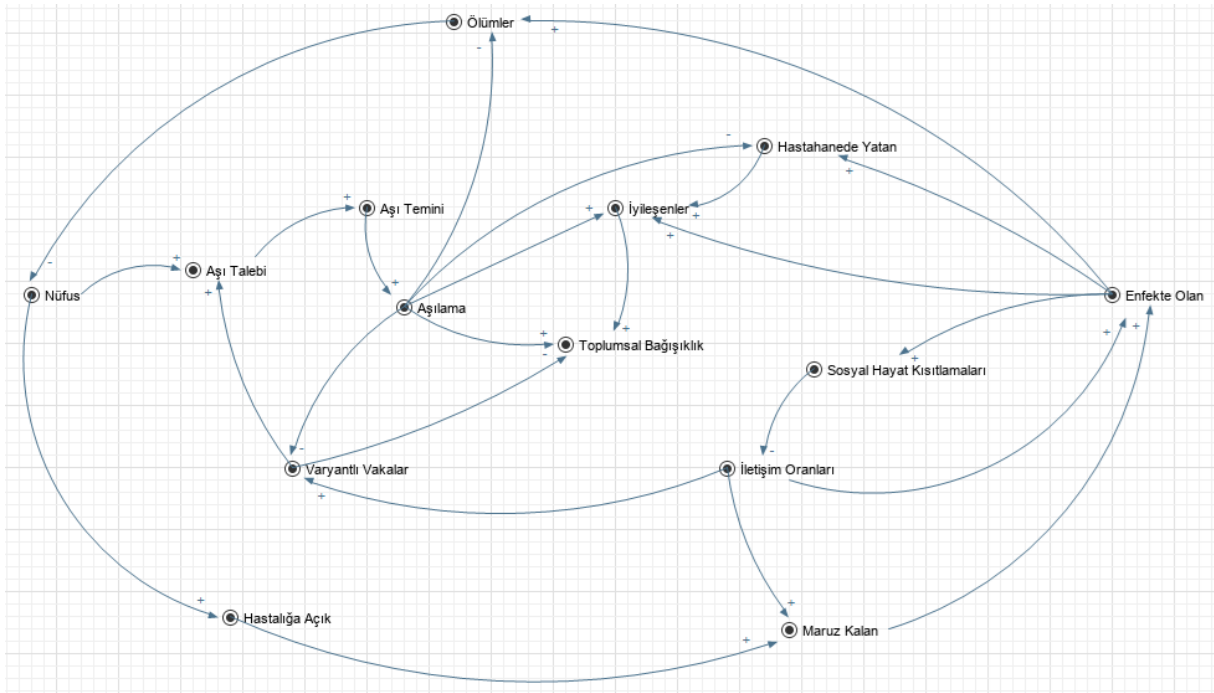


Şekil 8. SD modeline ait akış diyagramı

Nedensel döngü diyagramlarının oluşturulması

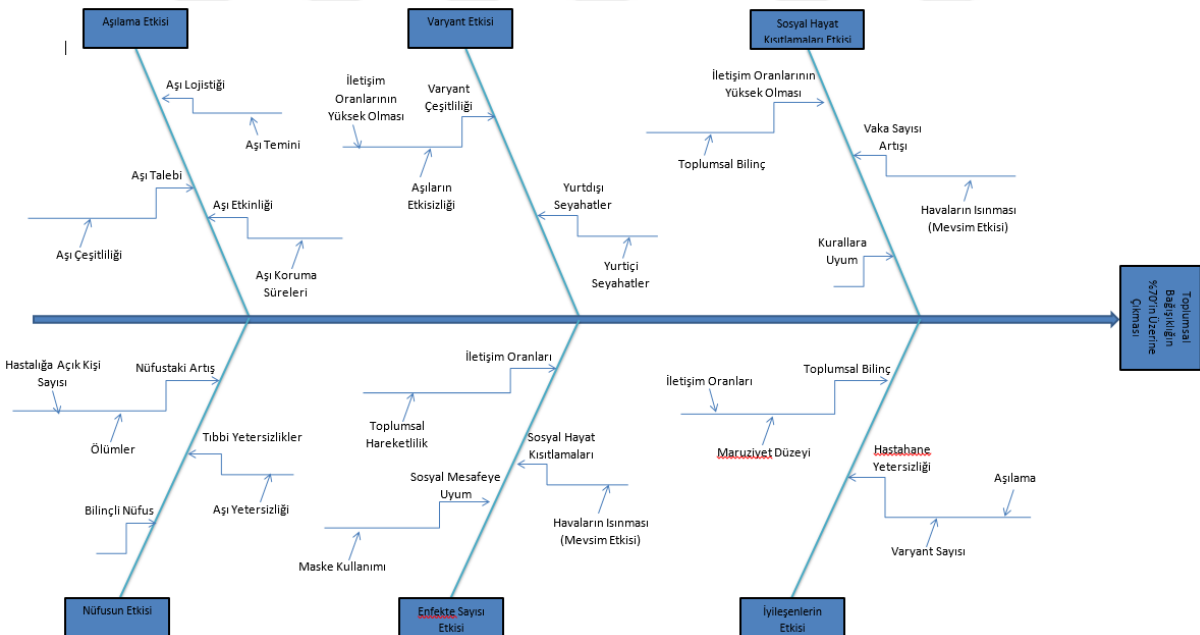
SD içinde bulunan parametre ve değişkenlerin birbirleriyle olan ilişkileri ile bu ilişkilerdeki davranışlarını, birbirleri üzerindeki pozitif veya negatif etkilerini göstermek için Nedensel Döngü Diyagramları (NDD) kullanılmaktadır. Nedensel döngü diyagramları SD modelleri için iki önemli role sahiptir. İlki, SD modelinin oluşturulması sırasında ön taslak görevi görmektedir. İkincisi ise, SD modelinin daha kolay bir şekilde anlaşılmasını sağlayarak modelin yorumunu yapmaya katkı sağlar. Bu nedenle bu diyagramlar, SD modeli içerisindeki yapısal gerçekleri hızlı ve etkili bir şekilde aktarma fırsatı sunar.

Biz bu çalışmada COVID-19 pandemisi üzerinde etkili olan birçok faktörü birlikte ele alan ve SD modeli bir yaklaşımla problemin simülasyonunu sağlayan geniş kapsamlı bir çalışma yapmış olduk. Bu çalışmamızın dinamiklerini ve modelimizde bulunan faktörlerimiz arasındaki neden-sonuç ilişkilerini yansıtan Nedensel Döngü Diyagramımız Şekil 9’da gösterilmektedir.



Şekil 9. SD modeline ait Nedensel Döngü Diyagramı

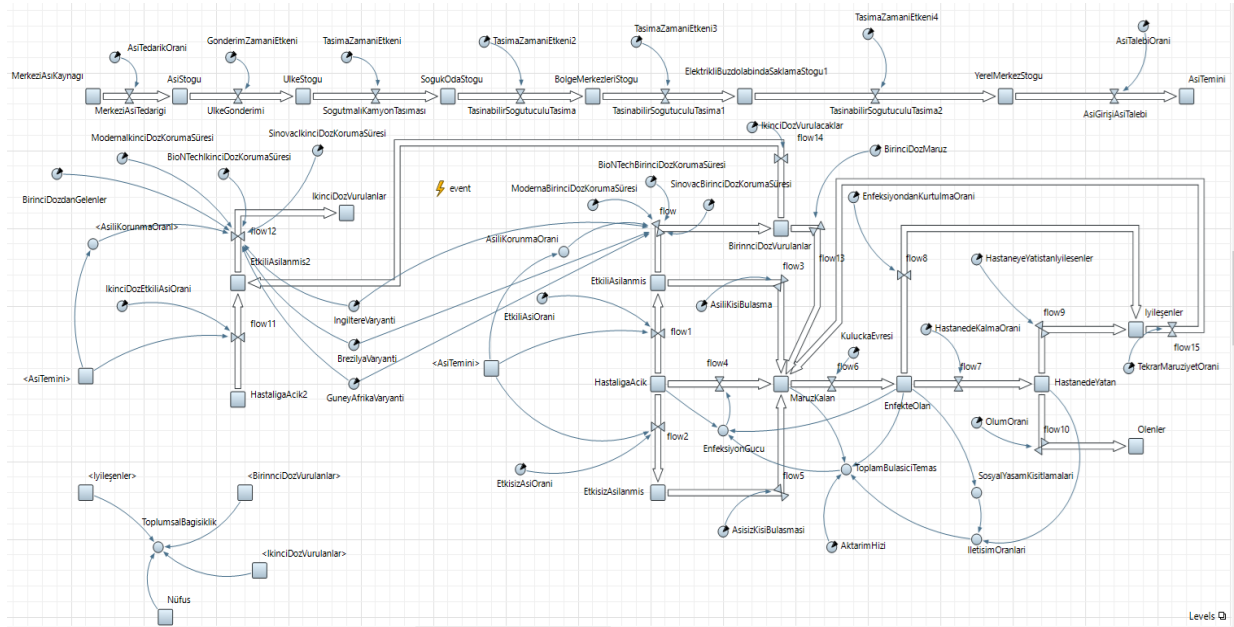
Modeldeki dinamiklerin ve faktörlerin modelin asıl hedefi olan toplumsal bağışıklığı ne denli etkilediğini daha iyi anlamamız için Şekil 10'da problemin SD modeline ait bir Balık Kılçığı diyagramı da gösterilmiştir.



Şekil 10. SD modeline ait Balık Kılçığı Diyagramı

SD modelinde kullanılan formülasyonlar ve veri analizi

COVID-19 salgın virüsünün nasıl yayıldığını ve ne gibi müdahale stratejileri ile nasıl bir aşılama politikası izleneceğinin doğal bir SD modeli çerçevesinde yapılmış simülasyon modeli için gerekli olan tüm parametre, değişken, stoklar ve akışları içerisinde barındıran AnyLogic 8.7.2 yazılımından elde edilen stok akış diyagramı Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. SD modeline ait Stok Akış diyagramı

Modelin oluşumda kullanılan veriler literatürdeki bazı referanslardan temin edilmiş veya literatür içerisinde bulunamayan bazı veri değerleri ise yapılan başka çalışmalardaki verilerden yararlanılarak SD modelinin çalıştırılması sağlanmıştır. Modeldeki bu verilerden stoklara ait olanlar Tablo 1’de verilmiştir. Stoklar içerisindeki MerkeziAsıKaynağı stok başlangıç değerine programın çalışma prensipleri gereği büyük bir değer girilmiştir. Aynı şekilde HastaligaAcik, HastaligaAcik2 ve Nüfus stoklarına ise Türkiye nüfusuna ait değer girilmiştir(TÜİK 2021).

Tablo 1. SD Modeline Ait Stok Bilgileri

Stok Adı	Başlangıç Değeri	Formül
MerkeziAsıKaynağı	100000000	MerkeziAsıKaynağı
AsiStogu	0	MerkeziAsıKaynağı-UlkeGonderimi
UlkeStogu	0	UlkeGonderimi-SogutmalıKamyonTasıması
SogukOdaStogu	0	SogutmalıKamyonTasıması-TasinabilirSogutuculuTasima
BolgeMerkezleriStogu	0	TasinabilirSogutuculuTasima-TasinabilirSogutuculuTasima1
ElektrikliBuzdolabındaSaklamaStogu1	0	TasinabilirSogutuculuTasima1-TasinabilirSogutuculuTasima2
YerelMerkezStogu	0	TasinabilirSogutuculuTasima2-AsiGirişiAsiTalebi
AsiTemini	0	AsiGirişiAsiTalebi
HastaligaAcik	83614000	-flow1-flow2-flow4
EtkiliAsilanmis	0	flow1-flow3-flow
EtkisizAsilanmis	0	flow2-flow5
MaruzKalan	0	flow13+flow3+flow4+flow5+flow15-flow6
EnfekteOlan	0	flow6-flow7-flow8
HastanedeYatan	0	flow7-flow10-flow9
Iyilesenler	0	flow8-flow9-flow15
Olenler	0	flow10
BirinciDozVurulanlar	0	flow-flow13-flow14
HastaligaAcik2	83614000	-flow11
EtkiliAsilanmis2	0	flow14+flow11-flow12
IkinciDozVurulanlar	0	flow12

Model içerisindeki yukarıda belirtilen stokları besleyen ve modelin geneli için iskelet görevi gören SD modelimize ait akışlar ve bu akışlara ait bilgiler aşağıda Tablo 2’de verilmiştir. Modeldeki akışlardan MerkeziAsıKaynağı, MerkeziAsıTedarigi, SogutmalıKamyonTasıması, TasinabilirSogutuculuTasima, TasinabilirSogutuculuTasima1, TasinabilirSogutuculuTasima2 ve AsiGirişiAsiTalebi modeldeki aşı lojistiği kısmına ait aşının teminini sağlayan model akışlarıdır. flow, flow1, flow2, flow3, flow4, flow5, flow6, flow7, flow8, flow9, flow10, flow11, flow12, flow13, flow14 ve flow15 akışları ise SD modelimiz içerisinde bulunan, COVID-19 salgınının toplum içinde bulaşmasından tutunda ölümlere ve iyileşmelere kadar tüm sistemin çalışmasını ve toplumun aşı vurulması ile birlikte toplumsal bağışıklığın yukarı yönde artışını sağlayan önemli temel taşlarıdır.

Tablo 2. SD Modeline Ait Akış Bilgileri

Akış Adı	İçerik/Formül
MerkeziAsiTedarigi	AsiTedarikOrani
UlkeGonderimi	GonderimZamaniEtkeni
SogutmalıKamyonTasıması	TasimaZamaniEtkeni
TasinabilirSogutuculuTasima	TasimaZamaniEtkeni2
TasinabilirSogutuculuTasima1	TasimaZamaniEtkeni3
TasinabilirSogutuculuTasima2	TasimaZamaniEtkeni4
AsiGirişiAsiTalebi	AsiTalebiOrani
flow	$(IngiltereVaryanti+BrezilyaVaryanti+GuneyAfrikaVaryanti)*$ $(AsiliKorunmaOrani*0.6*ModernaBirinciDozKorumaSuresi)+$ $(AsiliKorunmaOrani*0.3*BioNTechBirinciDozKorumaSuresi)+$ $(AsiliKorunmaOrani*0.1*SinovacBirinciDozKorumaSuresi)$
flow1	AsiTemini*EtkiliAsiOrani
flow2	AsiTemini*EtkisizAsiOrani
flow3	AsiliKisiBulasma
flow4	EnfeksiyonGucu
flow5	AsisizKisiBulasmasi
flow6	KuluckaEvresi
flow7	HastanedeKalmaOrani
flow8	EnfeksiyondanKurtulmaOrani
flow9	HastaneyeYatistanIyilesenler
flow10	OlumOrani
flow11	IkinciDozEtkiliAsiOrani*AsiTemini
flow12	$(IngiltereVaryanti+BrezilyaVaryanti+GuneyAfrikaVaryanti)*$ $BirinciDozdanGelenler*$ $(AsiliKorunmaOrani*0.6*ModernalkinciDozKorumaSuresi)+$ $(AsiliKorunmaOrani*0.3*BioNTechIkinciDozKorumaSuresi)+$ $(AsiliKorunmaOrani*0.1*SinovacIkinciDozKorumaSuresi)$
flow13	BirinciDozMaruz
flow14	IkinciDozVurulacaklar
flow15	TekrarMaruziyetOrani

SD modelimizde kullandığımız çeşitli parametrelere ait verileri ve bu verilere ait referansları Tablo 3’de, model içerisinde kullanılan yardımcı değişkenlere ait formülleri ise Tablo 4’de vermektedir. Bu parametre verilerinden bir kısmını literatürde bulabilmişken bir kısmını ise yapılan çalışmalardan yararlanarak belirlemekteyiz.

Tablo 3. SD Modeline Ait Parametre Bilgileri

Parametre Adı	Değeri/Formülü	Birimi	Referans
AsiTedarikOrani	15000000, 30000000, 40000000	Aylık	Varsayıldı
GonderimZamaniEtkeni	AsiTedarikOrani-10	Aylık	Varsayıldı
TasimaZamaniEtkeni	AsiTedarikOrani-10	Aylık	Varsayıldı
TasimaZamaniEtkeni2	AsiTedarikOrani-10	Aylık	Varsayıldı
TasimaZamaniEtkeni3	AsiTedarikOrani-10	Aylık	Varsayıldı
TasimaZamaniEtkeni4	AsiTedarikOrani-10	Aylık	Varsayıldı
AsiTalebiOrani	AsiTedarikOrani-10	Aylık	Varsayıldı
BirinciDozdanGelenler	0.90	double	Varsayıldı
ModernaBirinciDozKorumaSuresi	365	gün	Varsayıldı
ModernaikinciDozKorumaSuresi	365	gün	Varsayıldı
BioNTechBirinciDozKorumaSuresi	180	gün	Varsayıldı
BioNTechikinciDozKorumaSuresi	180	gün	Varsayıldı
SinovacBirinciDozKorumaSuresi	90	gün	Varsayıldı
SinovacikinciDozKorumaSuresi	90	gün	Varsayıldı
EtkiliAsiOrani	0.564	Günlük	(Swift et al., 2021)
EtkisizAsiOrani	0.436	Günlük	(Swift et al., 2021)
IkinciDozEtkiliAsiOrani	0.867	Günlük	(Swift et al., 2021)
IngiltereVaryanti	0.5	double	Varsayıldı
BrezilyaVaryanti	0.3	double	Varsayıldı
GuneyAfrikaVaryanti	0.1	double	Varsayıldı
IkinciDozVurulacaklar	0.90	double	Varsayıldı
AsiliKisiBulasma	0.0017	Günlük	(Sağlık Bakanlığı, 2021)
AsisizKisiBulasmasi	2.2	Günlük	(Locatelli et al., 2021)
BirinciDozMaruz	0.0017	Günlük	(Sağlık Bakanlığı, 2021)
KuluckaEvresi	14	gün	(Cimolai, 2021)
AktarimHizi	2.2	Günlük	(Locatelli et al., 2021)
EnfeksiyondanKurtulmaOrani	86.46	Günlük	(Sağlık Bakanlığı, 2021)
HastanedeKalmaOrani	20	Günlük	Varsayıldı
HastaneyeYatistanIyilesenler	90	Günlük	Varsayıldı
OlumOrani	0.083	Günlük	(Sağlık Bakanlığı, 2021)
TekrarMaruziyetOrani	0.0017	Günlük	(Sağlık Bakanlığı, 2021)

Tablo 4. SD Modeline Ait Yardımcı Değişken Bilgileri

Yardımcı Değişken Adı	İçerik/Formül
AsiliKorunmaOrani	$100 * (\text{AsiTemini} / 83614000)$
EnfeksiyonGucu	$\text{ToplamBulasiciTemas} / (\text{HastaligaAcik} + \text{EnfekteOlan})$
ToplamBulasiciTemas	$(\text{MaruzKalan} + \text{EnfekteOlan}) * (\text{AktarimHizi} + \text{IletisimOranlari})$
SosyalYasamKisitlemeleri	EnfekteOlan
IletisimOranlari	$\text{HastanedeYatan} * \text{SosyalYasamKisitlemeleri}$
event	$\text{if}(\text{FirstDoseGetVaccinated} \leq 2500000) \{ \text{SecondDoseGetVaccinated} = 0; \}$ $\text{if}(\text{FirstDoseGetVaccinated} > 2500000) \{ \text{SecondDoseGetVaccinated} = \text{SecondDoseGetVaccinated}; \}$

Senaryo Analizi

COVID-19 salgınının dünya genelinde hızlı bir şekilde yayılması, simülasyon modellerine olan ihtiyacı artırmış oldu. Bu ihtiyaçtan dolayı hızlı bir modelleme ile veya daha önce bulaşıcı hastalıklar için kullanılmış mevcut epidemik modellerin günümüz pandemisi olan COVID-19'a göre uyarlanarak kolayca modellenmesi bu çalışma kapsamında simüle edilmiştir.

Bu çalışmada simüle edilmiş olan senaryolar, COVID-19 pandemisinin hızlı bir şekilde yayıldığı ve etkisi altına aldığı ülkelerin başında gelen Türkiye Cumhuriyeti Devleti'ndeki COVID-19 salgını üzerinde kurulmuştur. Senaryolar gereği çeşitli COVID-19 pandemi verileri araştırılmış, yapılan çalışmalardan elde edilen bu verilerle birlikte COVID-19 pandemi senaryoları oluşturulmuştur.

Bu senaryolar içerisinde kullanılan bazı veriler ortak ve aynı değerlere sahip olarak simülasyona dahil edilirken, bazı veriler ise farklı senaryolar için değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmadaki senaryoların farklılaşan tarafı, literatürde yapılmış diğer çalışmalardan farklı olarak birçok pandemi faktörüne bağlı olan COVID-19 pandemisi için salgın hızını ve simüle edilen ülkedeki toplumsal bağışıklığın farklı aşı tedarik sayılarına göre simüle edilmesidir.

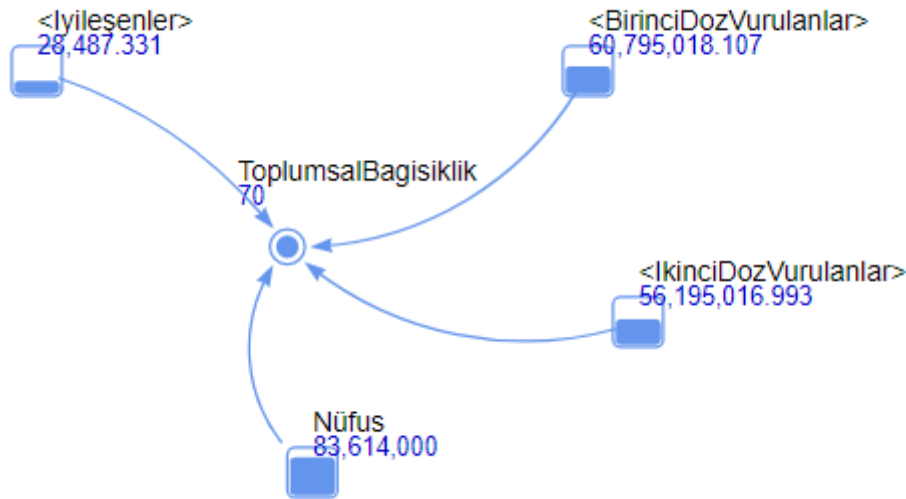
Bu çalışmada Türkiye Cumhuriyeti Devletindeki COVID-19 pandemisinin SD ile modellenmesini 83614000 kişilik nüfus için iki doz şeklinde uygulanan ve üç farklı aşı seçeneği olan bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Bu modelin tasarımında pandemi sürecinde ortaya çıkan üç farklı COVID-19 varyantı da modele eklenmiştir. Ayrıca model içerisinde literatürdeki diğer modellerden farklı olarak COVID-19 pandemisi için kullanılacak olan aşının tedarik edilmesi ve dağıtılması kısmını içine alan aşı lojistiği de bulunmaktadır.

Simülasyon Çıktıları

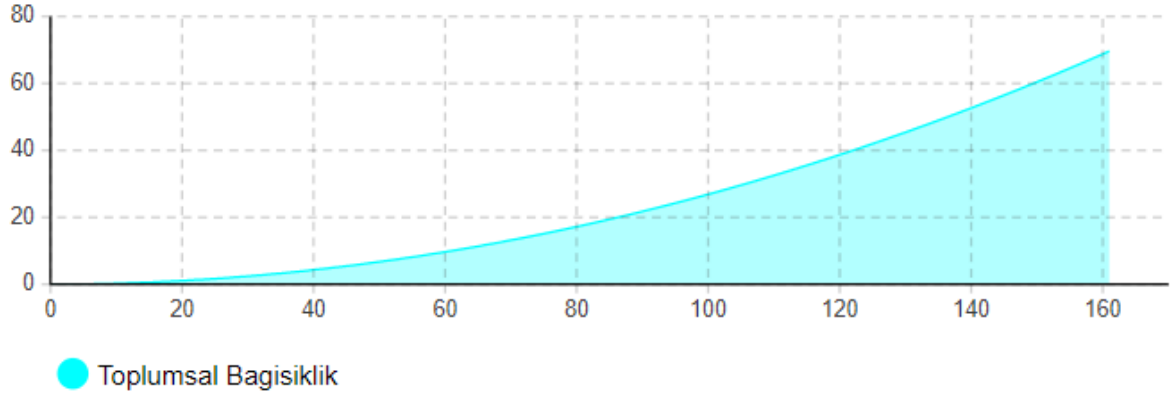
COVID-19 pandemisi için oluşturulan SD temelli simülasyon modelimizde üç farklı aşı tedarik değeri için model AnyLogic 8.7.2 programında çalıştırılmış ve gerekli simülasyon çıktıları elde edilmiştir. Modelde kullanılan farklı tedarik sayıları nüfusa bakılarak yaklaşık değerler üzerinde varsayılmıştır. Modelde 15000000, 30000000 ve 40000000 değerlerinde üç farklı aşı siparişinin aylık olarak tedarik edildiği varsayılmıştır. Bu değerler her seferinde ayrı ayrı programa girilerek çalıştırılmıştır. Kullanılan farklı aşı tedarik sayılarına göre elde edilen çıktılar yorumlanmıştır.

Senaryo 1:

İlk olarak aylık 15 milyon aşı adedi için program çalıştırılarak Şekil 12 ve Şekil 13'deki simülasyon çıktıları elde edilmiştir. Şekil 12' deki veriler ışığında aylık 15 milyon aşı adedi ile Toplumsal Bağışıklığın %70'e ulaşabilmesi için Birinci Doz yapılan aşı sayısının yaklaşık olarak 60795018 adet olduğu, İkinci Doz yapılan aşı sayısının ise yaklaşık olarak 56195016 adet olduğu söylenebilir. Ayrıca bu süre zarfında COVID-19 salgınına yakalanıp daha sonra iyileşerek kendi bağışıklığını oluşturan ve Toplumsal Bağışıklığa pozitif yönde etki eden yaklaşık 28487 adet hasta olduğu da söylenebilir. Model çalıştırılıp Toplumsal Bağışıklığın %70'e çıkması Şekil 13'deki grafiğe göre yaklaşık olarak 161 günde olmuştur. Yani aylık 15 milyon adet aşı tedariki ile 161 günde ülkenin Toplumsal Bağışıklığının %70'e ulaşacağı tahmin edilmektedir.



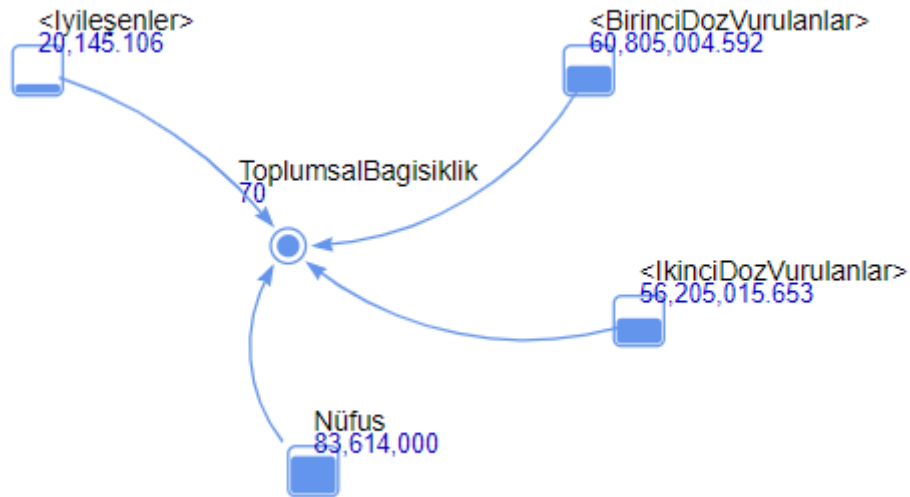
Şekil 12. Aylık 15 milyon adet aşı tedariki için elde edilen sayısal veri çıktısı.



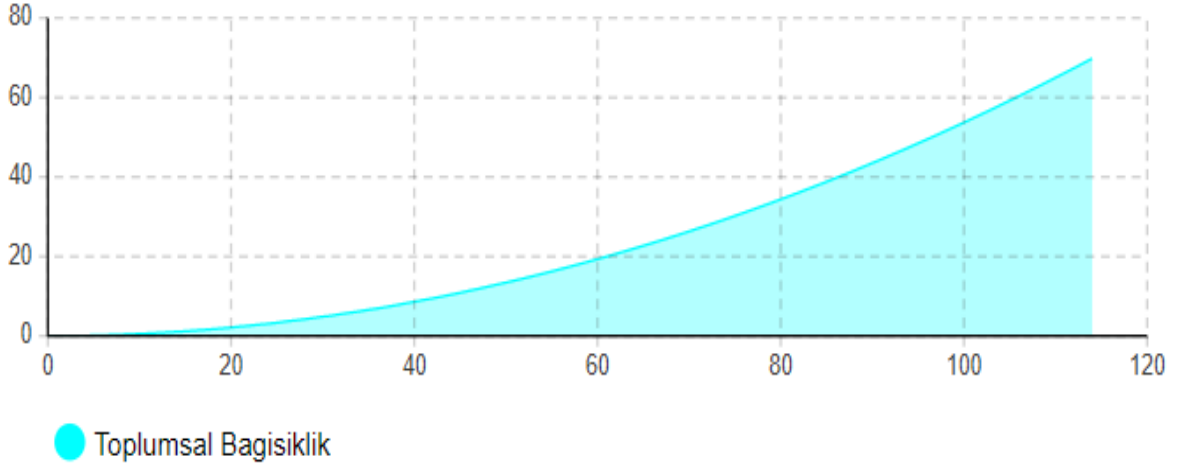
Şekil 13. Aylık 15 milyon adet aşı tedariği için elde edilen zaman grafiği

Senaryo 2:

İkinci senaryomuzda aylık 30 milyon aşı adedi için program çalıştırılarak Şekil 14 ve Şekil 15'deki simülasyon çıktıları elde edilmiştir. Şekil 14'deki veriler ışığında aylık 30 milyon aşı adedi ile Toplumsal Bağışıklığın %70'e ulaşabilmesi için Birinci Doz yapılan aşı sayısının yaklaşık olarak 60805004 adet olduğu, İkinci Doz yapılan aşı sayısının ise yaklaşık olarak 56205015 adet olduğu söylenebilir. Ayrıca bu süre zarfında COVID-19 salgınına yakalanıp daha sonra iyileşerek kendi bağışıklığını oluşturan ve Toplumsal Bağışıklığa pozitif yönde etki eden yaklaşık 20145 adet hasta olduğu da söylenebilir. Model çalıştırılıp Toplumsal Bağışıklığın %70'e çıkması Şekil 15'deki grafiğe göre yaklaşık olarak 117 günde olmuştur. Yani aylık 30 milyon adet aşı tedariği ile 117 günde ülkenin Toplumsal Bağışıklığının %70'e ulaşacağı tahmin edilmektedir.



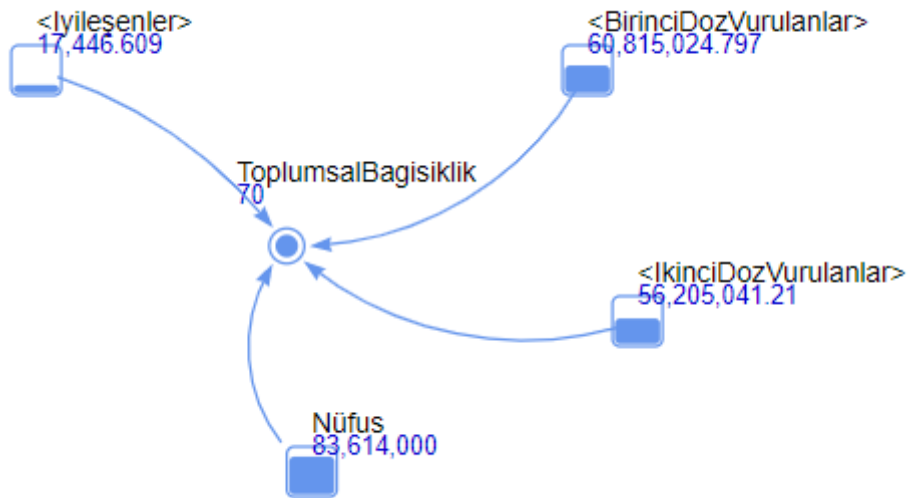
Şekil 14. Aylık 30 milyon adet aşı tedariği için elde edilen sayısal veri çıktısı



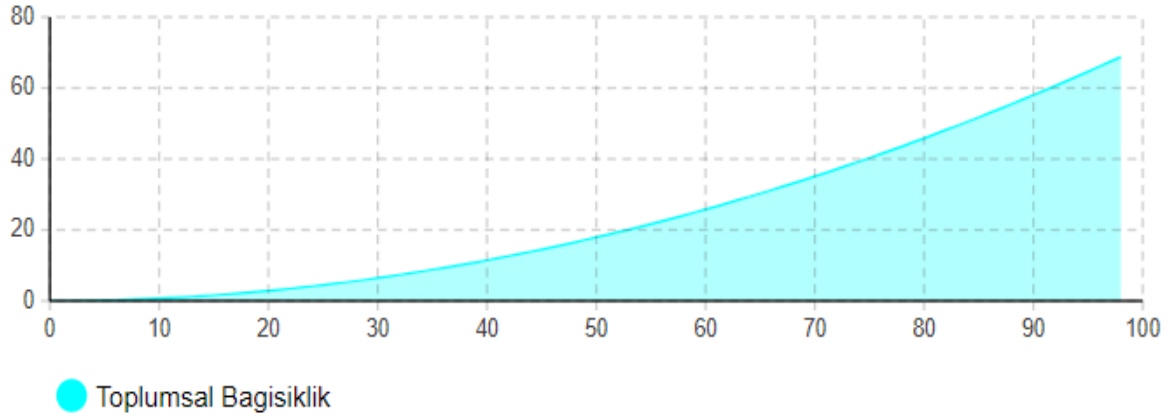
Şekil 15. Aylık 30 milyon adet aşı tedariği için elde edilen zaman grafiği

Senaryo 3:

Son olarak üçüncü senaryomuzda ise aylık 40 milyon aşı adedi için program çalıştırılarak Şekil 16 ve Şekil 17'deki simülasyon çıktıları elde edilmiştir. Şekil 16'daki veriler ışığında aylık 40 milyon aşı adedi ile Toplumsal Bağışıklığın %70'e ulaşabilmesi için Birinci Doz yapılan aşı sayısının yaklaşık olarak 60815024 adet olduğu, İkinci Doz yapılan aşı sayısının ise yaklaşık olarak 56205041 adet olduğu söylenebilir. Ayrıca bu süre zarfında COVID-19 salgınına yakalanıp daha sonra iyileşerek kendi bağışıklığını oluşturan ve Toplumsal Bağışıklığa pozitif yönde etki eden yaklaşık 17446 adet hasta olduğu da söylenebilir. Model çalıştırılıp Toplumsal Bağışıklığın %70'e çıkması Şekil 17'deki grafiğe göre yaklaşık olarak 98 günde olmuştur. Yani aylık 30 milyon adet aşı tedariği ile 98 günde ülkenin Toplumsal Bağışıklığının %70'e ulaşacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 16. Aylık 40 milyon adet aşı tedariği için elde edilen sayısal veri çıktısı.



Şekil 17. Aylık 40 milyon adet aşı tedarığı için elde edilen zaman grafiği.

Tartışma

Bir önceki bölümde elde edilen sayısal veriler ve grafiklere baktığımızda üç farklı aşı tedarik senaryosuna göre üç farklı sonuç elde edilmiştir. Bu senaryolardan ilkinde Şekil 12'deki sayısal veriler ile ikinci senaryonun sayısal verilerini elde ettiğimiz Şekil 14'deki veriler karşılaştırıldığında Birinci Doz yapılan aşılarda bakımından ikinci senaryonun birinci senaryodan 9986 adet aşı farkı oluşurken İkinci Doz yapılan aşılarda ise 9999 adet aşı farkı oluşmuştur. Buna rağmen iyileşen hasta sayılarında ise birinci senaryonun ikinci senaryodan 8342 adet iyileşen hasta fazlası olmuştur. Şekil 16'ya bakarak bu hesaplamayı üçüncü senaryo için yaptığımızda ilk iki senaryoya göre birinci ve ikinci doz yapılan aşılarda üçüncü senaryoda diğer senaryolara nazaran daha fazla aşı yapıldığı görülmüştür. Aynı şekilde iyileşen hasta sayıları karşılaştırıldığında üçüncü senaryoda ilk iki senaryoya göre daha az sayıda iyileşen hasta olduğu gözlemlenmiştir.

Diğer bir farkta üç senaryo içinde elde edilen zaman grafiklerinde oluşmuştur. İlk senaryonun zaman grafiği olan Şekil 13'e baktığımızda 161 günde Toplumsal Bağışıklık %70'e ulaşırken, ikinci ve üçüncü senaryolarda bu sayı Şekil 15 ve Şekil 17'den sırasıyla 117 gün ve 98 gün olarak elde edilmiştir.

Üçüncü bölümde elde edilen sayısal verilere ve grafiklere bakıldığında, üç farklı aşı tedarik senaryosuna göre üç farklı sonuç elde edilmiştir. Bu sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Simülasyona Ait Senaryo Sonuçları

	Aşılama Sayısı (Aylık)	Doz 1	Doz 2	İyileşenler	Simülasyon Zamanı (Gün)
Senaryo 1	15 Milyon	60795017	56195016	28487	161
Senaryo 2	30 Milyon	60805004	56205015	20145	117
Senaryo 3	40 Milyon	60816623	56208110	17446	98

SONUÇLAR

SD temelli COVID-19 pandemisi için geliştirilen bu çalışmadan ve çalışmaya ait yapılan sayısal analizden şu sonuçlar elde edilmiştir;

- Aylık aşı temini ile topluma uygulanan aşı sayısı artırıldığında, Toplumsal Bağışıklığın %70'e ulaşması için gereken gün sayısında gözle görülür bir azalma olmuştur.
- Aşılama sonrası elde edilen zaman grafiklerinden toplumsal bağışıklığın zamansal olarak hızlanmasının 2. doz aşılarda uygulandığı 28. günden sonra daha fazla olduğunu görmekteyiz.
- Aylık aşı tedariki ile topluma uygulanan aşı sayısı artırıldığında, toplumsal bağışıklığı etkileyen 1. ve 2. doz aşılarda artış olurken, tam tersine iyileşen hasta sayısında azalma olmuştur. Bu da sürü bağışıklığını etkilemede aşılama birey sayısının hastalıktan kurtulan insan sayısından daha önemli olduğunu kanıtlıyor.
- Yapılan aşılama için içerisinde yedi taşıma aşaması bulunan sekiz stok noktalı geniş ölçekli bir Aşı Lojistiği ağı simülasyona eklenmiştir. Bu lojistik ağının aksamadan akıcı bir şekilde aşılama taşıması için model karmaşıklığından uzak ve sistemli bir şekilde kurulmuştur. Aşıların ilk tedarik noktasından son tedarik noktasına kadar olabildiğince az kayıpla taşınmış olması sistemin aksamadığını ve uygulanan aşı sayılarında herhangi bir dengesizliğin söz konusu olmadığını göstermektedir.
- Sistemde modellenen İngiltere, Brezilya ve Güney Afrika varyantları aşılama ile hedeflenen sürü bağışıklığına ulaşmada olumsuz etki gösterirken, farklı etki oranlarına sahip olan Biontech, Sinovac ve Moderna aşılama hedeflenen sürü bağışıklığı düzeyine ulaşmada olumlu etki sağlamıştır.

Özetlemek gerekirse, COVID-19 pandemisi için geliştirilen SD temelli bu simülasyon çalışmasında gerek Türkiye Cumhuriyeti Devleti gerekse dünya genelinden elde edilen salgın verileri ile model oluşturulmuş ve çeşitli veriler elde edilerek yorumlanmıştır. Elde edilen bu veriler bizlere uygulamanın yapıldığı toplum olan T.C Devletindeki bağışıklığın hangi faktörlerce etkilendiğini ve literatürde de kabul görmüş olan toplumsal bağışıklığın %70 sınırını geçtiğinde toplumda salgına karşı büyük bir korumanın oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca yaptığımız bu çalışma ile Toplumsal Bağışıklığın artırılması noktasında topluma uygulanan aşı sayılarındaki artışın, toplumun bağışıklığını artırmaya yönelik etkisi olduğu bilinen iyileşen kişi sayılarından çok daha fazla etkili olduğu görülmüştür.

KAYNAKÇA

- Akpınar, H. (2012). Bulaşıcı hastalıkların yayılımının tahmininde deterministik modellerin kullanılması.
- Alexanderian, A., Gobbert, M. K., Fister, K. R., Gaff, H., Lenhart, S., & Schaefer, E. (2011). An age-structured model for the spread of epidemic cholera: analysis and simulation. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 12(6), 3483-3498.
- Angeloudis, P., & Bell, M. G. (2011). A review of container terminal simulation models. *Maritime Policy & Management*, 38(5), 523-540.
- Araz, O. M. (2013). Integrating complex system dynamics of pandemic influenza with a multi-criteria decision making model for evaluating public health strategies. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 22(3), 319-339. <https://doi.org/10.1007/s11518-013-5220-y>
- [Record #45 is using a reference type undefined in this output style.]
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System dynamics review: the journal of the System Dynamics Society*, 12(3), 183-210.
- Barlas, Y. (2007). System dynamics: systemic feedback modeling for policy analysis. *System*, 1(59), 1-29.
- Battiston, P., & Gamba, S. (2021). COVID-19: R-0 is lower where outbreak is larger. *Health Policy*, 125(2), 141-147. <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2020.10.017>
- Beckley, R., Weatherspoon, C., Alexander, M., Chandler, M., Johnson, A., & Bhatt, G. S. (2013). Modeling epidemics with differential equation. *Tennessee State University Internal Report*.
- Bouchhima, F., Nicolescu, G., Aboulhamid, E. M., & Abid, M. (2007). Generic discrete–continuous simulation model for accurate validation in heterogeneous systems design. *Microelectronics journal*, 38(6-7), 805-815.
- Carson, J. S. (2004). Introduction to modeling and simulation. Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, 2004.,
- Ciccolini, M., Dahl, J., Chase-Topping, M., & Woolhouse, M. E. (2012). Disease transmission on fragmented contact networks: Livestock-associated Methicillin-resistant Staphylococcus aureus in the Danish pig-industry. *Epidemics*, 4(4), 171-178.
- Cimolai, N. (2021). In pursuit of the right tail for the COVID-19 incubation period. *Public Health*.
- Comunian, A., Gaburro, R., & Giudici, M. (2020). Inversion of a SIR-based model: A critical analysis about the application to COVID-19 epidemic. *Physica D-Nonlinear Phenomena*, 413. <https://doi.org/ARTN 132674>
- 10.1016/j.physd.2020.132674
- Currie, C. S. M., Fowler, J. W., Kotiadis, K., Monks, T., Onggo, B. S., Robertson, D. A., & Tako, A. A. (2020). How simulation modelling can help reduce the impact of COVID-19. *Journal of Simulation*, 14(2), 83-97. <https://doi.org/10.1080/17477778.2020.1751570>
- Dafilis, M. P., Frascoli, F., McVernon, J., Heffernan, J. M., & McCaw, J. M. (2014). The dynamical consequences of seasonal forcing, immune boosting and demographic change in a model of disease transmission. *Journal of theoretical biology*, 361, 124-132.

- Doyle, J. K., & Ford, D. N. (1998). Mental models concepts for system dynamics research. *System dynamics review: the journal of the System Dynamics Society*, 14(1), 3-29.
- Fu, B., Wu, M., Che, Y., Wang, M., Huang, Y., & Bai, Y. (2015). The strategy of a low-carbon economy based on the STIRPAT and SD models. *Acta Ecologica Sinica*, 35(4), 76-82.
- Garson, G. D. (2009). Computerized simulation in the social sciences: A survey and evaluation. *Simulation & Gaming*, 40(2), 267-279.
- Gebremeskel, A. A., Berhe, H. W., & Atsbaha, H. A. (2021). Mathematical modelling and analysis of COVID-19 epidemic and predicting its future situation in Ethiopia. *Results in Physics*, 22, 103853.
- Gibb, A., St-Jacques, M., Nourry, G., & Johnson, M. (2002). A comparison of deterministic vs stochastic simulation models for assessing adaptive information management techniques over disadvantaged tactical communication networks. *7th ICCRTS*, 1-16.
- Gökçe, M. (2008). Tedarik zincir yönetiminin sistem dinamiği ve ajan bazlı yaklaşımla modellenerek karşılaştırılması.
- Gönül-Sezer, E. D., & Ocak, Z. (2020). A system dynamics model for the analysis of clinical laboratory productivity. *International Transactions in Operational Research*, 27(6), 3144-3166.
- He, R., Liu, S., & Liu, Y. (2011). Application of SD model in Analyzing the Cultivated Land Carrying Capacity: A Case Study in Bijie Prefecture, Guizho Province, China. *Procedia Environmental Sciences*, 10, 1985-1991.
- Hu, H., Nigmatulina, K., & Eckhoff, P. (2013). The scaling of contact rates with population density for the infectious disease models. *Mathematical biosciences*, 244(2), 125-134.
- Ibarra-Vega, D. (2020). Lockdown, one, two, none, or smart. Modeling containing covid-19 infection. A conceptual model. *Science of the Total Environment*, 730, 138917.
- Koçonalı, F. (2009). *Montaj hattı dengelemeye yönelik bir simülasyon modeli önerisi* Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Konyalıoğlu, A., & Bereketli Zafeirakopoulos, İ. (2018). A System Dynamics Model for Small Household Appliances' Waste Management: A Case of Turkey. *Protection and Restoration of the Environment XIV, PREXIV, Thessaloniki, Greece*, 411-417.
- Leung, K., Lipsitch, M., Yuen, K. Y., & Wu, J. T. (2017). Monitoring the fitness of antiviral-resistant influenza strains during an epidemic: a mathematical modelling study. *The Lancet Infectious Diseases*, 17(3), 339-347.
- Levy, B., Edholm, C., Gaoue, O., Kaondera-Shava, R., Kgosimore, M., Lenhart, S., Lephodisa, B., Lungu, E., Marijani, T., & Nyabadza, F. (2017). Modeling the role of public health education in Ebola virus disease outbreaks in Sudan. *Infectious Disease Modelling*, 2(3), 323-340.
- Locatelli, I., Trächsel, B., & Rousson, V. (2021). Estimating the basic reproduction number for COVID-19 in Western Europe. *Plos one*, 16(3), e0248731.
- Lu, Z., Chi, X., & Chen, L. (2002). The effect of constant and pulse vaccination on SIR epidemic model with horizontal and vertical transmission. *Mathematical and computer modelling*, 36(9-10), 1039-1057.
- Maani, K. E., & Cavana, R. Y. (2000). *Systems thinking and modelling: Understanding change and complexity*. Prentice hall.

- Mahamoud, A., Roche, B., & Homer, J. (2013). Modelling the social determinants of health and simulating short-term and long-term intervention impacts for the city of Toronto, Canada. *Social science & medicine*, 93, 247-255.
- McCormack, R. K., & Allen, L. J. (2005). Disease emergence in deterministic and stochastic models for host and pathogen. *Applied mathematics and computation*, 168(2), 1281-1305.
- Moneim, I. (2007). The effect of using different types of periodic contact rate on the behaviour of infectious diseases: A simulation study. *Computers in Biology and Medicine*, 37(11), 1582-1590.
- Morecroft, J. D. (2015). *Strategic modelling and business dynamics: A feedback systems approach*. John Wiley & Sons.
- Moualeu, D. P., Weiser, M., Ehrig, R., & Deuflhard, P. (2015). Optimal control for a tuberculosis model with undetected cases in Cameroon. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 20(3), 986-1003.
- Nance, R. E., Sargent, R. G., & Wilson, J. R. (2013). A retrospective oral history of computer simulation: Progress report. 2013 Winter Simulations Conference (WSC),
- Öztemel, E., Dinçmen, M., Saatçioğlu, Ömer., Fırat, S.Ü.O., Dereli, T., Baykasoğlu, A., Erensa C.Y., Kaylan, A.R., Taşkın H., Yenersoy, G., Eyler, M.A., Kubat, C., Tekez, E.K., Arslankaya, S., Polat, T.K., Bulkan S., . (2009). Benzetim, Bölüm 14. In İ. Papatya Yayıncılık Eğitim (Ed.), *Endüstri Mühendisliğine Giriş* (pp. 357-352).
- Padhi, R., & Bhardhwaj, J. R. (2009). An adaptive drug delivery design using neural networks for effective treatment of infectious diseases: a simulation study. *Computer methods and programs in biomedicine*, 94(3), 207-222.
- Poletto, C., Tizzoni, M., & Colizza, V. (2013). Human mobility and time spent at destination: impact on spatial epidemic spreading. *Journal of theoretical biology*, 338, 41-58.
- Rao, P. R. S., & Kumar, M. N. (2015). A dynamic model for infectious diseases: the role of vaccination and treatment. *Chaos, Solitons & Fractals*, 75, 34-49.
- Reiner Jr, R. C., Stoddard, S. T., & Scott, T. W. (2014). Socially structured human movement shapes dengue transmission despite the diffusive effect of mosquito dispersal. *Epidemics*, 6, 30-36.
- [Record #56 is using a reference type undefined in this output style.]
- Sağlık Bakanlığı. (2021). <https://covid19.saglik.gov.tr/TR-66935/genel-koronavirus-tablosu.html>
- Sahu, G. P., & Dhar, J. (2015). Dynamics of an SEQIHRs epidemic model with media coverage, quarantine and isolation in a community with pre-existing immunity. *Journal of mathematical analysis and applications*, 421(2), 1651-1672.
- Salkın, S. C. (2014). *Geleneksel ve e-ticaret tedarik zinciri risk yönetiminin sistem dinamiği yaklaşımıyla modellenmesi* Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Salman, A. M., Ahmed, I., Mohd, M. H., Jamiluddin, M. S., & Dheyab, M. A. (2021). Scenario analysis of COVID-19 transmission dynamics in Malaysia with the possibility of reinfection and limited medical resources scenarios. *Computers in Biology and Medicine*, 133, 104372.
- Samsuzzoha, M., Singh, M., & Lucy, D. (2011). Numerical study of a diffusive epidemic model of influenza with variable transmission coefficient. *Applied Mathematical Modelling*, 35(12), 5507-5523.

- Scabini, L. F., Ribas, L. C., Neiva, M. B., Junior, A. G., Farfán, A. J., & Bruno, O. M. (2021). Social interaction layers in complex networks for the dynamical epidemic modeling of COVID-19 in Brazil. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 564, 125498.
- Scheidegger, A. P. G., Pereira, T. F., de Oliveira, M. L. M., Banerjee, A., & Montevechi, J. A. B. (2018). An introductory guide for hybrid simulation modelers on the primary simulation methods in industrial engineering identified through a systematic review of the literature. *Computers & Industrial Engineering*, 124, 474-492.
- Schoemaker, P. J. (1995). Scenario planning: a tool for strategic thinking. *Sloan management review*, 36(2), 25-50.
- Shah, N. H., Sheoran, N., Jayswal, E., Shukla, D., Shukla, N., Shukla, J., & Shah, Y. (2020). Modelling COVID-19 transmission in the United States through interstate and foreign travels and evaluating impact of governmental public health interventions. *Journal of mathematical analysis and applications*, 124896.
- Shahrear, P., Rahman, S. S., & Nahid, M. M. H. (2021). Prediction and mathematical analysis of the outbreak of coronavirus (COVID-19) in Bangladesh. *Results in Applied Mathematics*, 10, 100145.
- Shulgin, B., Stone, L., & Agur, Z. (1998). Pulse vaccination strategy in the SIR epidemic model. *Bulletin of mathematical biology*, 60(6), 1123-1148.
- Sterman, J. (2002). System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world.
- Swift, M. D., Breeher, L. E., Tande, A. J., Tommaso, C. P., Hainy, C. M., Chu, H., Murad, M. H., Berbari, E. F., & Virk, A. (2021). Effectiveness of mRNA COVID-19 vaccines against SARS-CoV-2 infection in a cohort of healthcare personnel. *Clinical Infectious Diseases*.
- Şenaras, A. E. (2016). Döviz kuru davranışının sistem dinamiği yaklaşımıyla incelenmesi.
- Şengül, T., & Yıldız, E. (2021). A dynamical systems approach to the interplay between tobacco smokers, electronic-cigarette smokers and smoking quitters. *Chaos, Solitons & Fractals*, 146, 110870.
- Tan, J., Li, A., Lei, G., & Xie, X. (2019). A SD-MaxEnt-CA model for simulating the landscape dynamic of natural ecosystem by considering socio-economic and natural impacts. *Ecological Modelling*, 410, 108783.
- Tan, Y., & Wang, X. (2010). An early warning system of water shortage in basins based on SD model. *Procedia Environmental Sciences*, 2, 399-406.
- TÜİK (2021). <https://www.hurriyet.com.tr/gundem/turkiyenin-nufusu-2021-yilinda-ne-kadar-oldu-tuikten-aciklama-geldi-41732522#:~:text=T%C3%9C%C4%B0K%20taraf%C4%B1ndan%20a%C3%A7%C4%B1klayan%20rakama%20g%C3%B6re,83%20milyon%20614%20bin%20oldu>.
- Varotsos, C. A., & Krapivin, V. F. (2020). A new model for the spread of COVID-19 and the improvement of safety. *Safety Science*, 132, 104962.
- Wang, H., Zhang, J., & Zeng, W. (2018). Intelligent simulation of aquatic environment economic policy coupled ABM and SD models. *Science of the Total Environment*, 618, 1160-1172.
- Wang, Y., Cao, J., Alsaedi, A., & Ahmad, B. (2017). Edge-based SEIR dynamics with or without infectious force in latent period on random networks. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 45, 35-54.

Yamamoto, H., Yamaji, K., & Fujino, J. (1999). Evaluation of bioenergy resources with a global land use and energy model formulated with SD technique. *Applied Energy*, 63(2), 101-113.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Ferhat AK
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	T.C.
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Kazım Karabekir Teknik Meslek Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği (2013 – 2017)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı (2019 – 2021)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi